

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

**RAY-TRACER PRO ÚČELY RADIAČNÍ ANALÝZY
ELEKTRONICKÝCH SOUČÁSTEK**

RAY TRACER FOR RADIATION ANALYSIS OF ELECTRONIC COMPONENTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Matej Klement

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marek Bohrn, Ph.D.

BRNO 2021

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Mikroelektronika a technologie**

Ústav mikroelektroniky

Student: Matej Klement

ID: 211229

Ročník: 3

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Ray-tracer pro účely radiační analýzy elektronických součástek

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem projektu je vytvořit prostředí, které umožní provádět goniometrická měření na modelu analyzovaného objektu. Na základě měření prostorových vztahů a nastavených vlastností materiálů bude určena úroveň stínění, resp. intenzita radiace v daném bodu objektu. Kvalita modelování bude srovnána s referenčním sektorovým modelem.

Podporovaný formát vstupních prostorových dat musí být alespoň jeden z formátů běžně používaných pro popis prostorové geometrie, např: STL, STEP.

Prostředí pro realizaci projektu může být MATLAB/Octave, Python, Visual C a podobné. V případě realizace v interpretovaném jazyce a vytvoření neúměrných nároků na výpočetní výkon bude vhodné algoritmy převést do jiné platformy.

Výstupem práce bude program provádějící potřebné simulace. S pomocí výstupů z tohoto programu bude provedena vzorová TID radiační analýza elektronických součástek a odhalení míst pro dodatečné odstínění.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 3.6.2021

Vedoucí práce: Ing. Marek Bohrn, Ph.D.

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Táto práca sa zaoberá problematikou radiačnej analýzy. V rámci práce sú popísané metódy počítania množstva dopadajúcej ionizujúcej a neionizujúcej radiácie na súčiastku vnútri tieniacej skrinky. Metódy počítania sú odvodené z popisu platných noriem pre vesmírne misie agentúry ESA. Na základe týchto metód boli vytvorené dva skripty v prostredí MATLAB a jeden samostatný program pre počítanie množstva radiácie. Jedným z cieľov práce bolo porovnať jednotlivé metódy na základe ich výsledkov a princípov počítania. Hlavným cieľom práce bolo vytvoriť samostatný program Ray trace, ktorý môže slúžiť ako užitočný nástroj pre návrhára elektronických obvodov pre špecializované účely. Tento program dokáže spočítať radiáciu vnútri tieniacej geometrie, odhaliť slabé miesta v tienení alebo ukázať najideálnejšie umiestnenie citlivej súčiastky.

Kľúčové slová

TID analýza, radiačná analýza, sektorový model, Ray trace model, tienenie radiácie

Abstract

This thesis describes the methods of radiation analysis. It explains methods for calculating incident ionizing and non-ionizing radiation inside a shielding box. The methods are derived from active ESA standards for space engineering. Two MATLAB scripts and a stand-alone program were created based on these methods. One of the aims of this thesis was to compare the calculation methods based on their results and calculation principles. The main goal was to create a stand-alone program, which can be used as a useful tool for a special electronic circuit design engineer. This program can be used for calculating radiation inside a shielding geometry, discovering weak spots of the geometry, or showing ideal spots for the placement of a sensitive component.

Keywords

TID analysis, radiation analysis, sector model, Ray trace model, radiation shielding

Bibliografická citácia

KLEMENT, Matej. Ray-tracer pro účely radiační analýzy elektronických součástek. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/134974>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedúci práce Marek Bohrn.

Prehlásenie autora o pôvodnosti diela

Meno a priezvisko študenta:	Matej Klement
VUT ID študenta:	211229
Typ práce:	Bakalárska práca
Akademický rok:	2020/21
Téma záverečnej práce:	Ray-tracer pro účely radiační analýzy elektronických součástek

Vyhlasujem, že svoju záverečnú prácu som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho záverečnej práce, s využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce. Ako autor uvedenej záverečnej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto záverečnej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

V Brne dňa:

podpis autora

Pod'akovanie

Chcel by som sa pod'akovať svojmu školiteľovi Ing. Marek Bohrn, Ph.D. za cenné rady a odbornú pomoc, ktoré mi poskytol pri písaní bakalárskej práce.

V Brne, dňa:

podpis autora

Obsah

ÚVOD	8
1. TID ANALÝZA	10
1.1 ÚVOD	10
1.2 DEFINÍCIA TID	10
1.3 VÝPOČET TID	10
1.4 TECHNOLOGIE CITLIVÉ NA TID	11
2. VÝPOČETNÉ METÓDY PRE TID A TNID ANALÝZY	13
2.1 ZJEDNODUŠENIE POMOCOU PLOŠNÝCH A SFÉRICKÝCH GEOMETRIÍ	14
2.2 DETAILNÁ SEKTOROVÁ METÓDA	16
2.2.1 Príklad počítania detailnej sektorovej analýzy	17
2.3 RAY TRACE METÓDA	18
3. IMPLEMENTÁCIA SEKTOROVEJ METÓDY	19
3.1 NORM MODEL	19
3.2 SLANT MODEL	21
4. IMPLEMENTÁCIA RAY-TRACE METÓDY	22
4.1 POPIS GEOMETRIE	22
4.2 ROZLOŽENIE LÚČOV	24
4.2.1 Porovnanie rozložení	25
4.3 PREPOČET RADIÁCIE	30
5. REALIZÁCIA ALGORITMU	31
5.1 NORM SEKTOROVÁ ANALÝZA	31
5.1.1 Vstup algoritmu	31
5.1.2 Jadro	31
5.1.3 Výstup	32
5.2 SLANT SEKTOROVÁ ANALÝZA	32
5.2.1 Vstup algoritmu	32
5.2.2 Jadro	32
5.3 RAY TRACE ANALÝZA	33
5.3.1 Vstup algoritmu	33
5.3.2 Inicializácia	33
5.3.3 Jadro	33
5.3.4 Užívateľské rozhranie	36
6. POROVNANIE METÓD ANALÝZY	43
6.1 REFERENČNÁ GEOMETRIA A	45
6.2 REFERENČNÁ GEOMETRIA B	47
6.3 REFERENČNÁ GEOMETRIA C	49
6.4 VYHODNOTENIE VÝSLEDKOV	52
ZÁVER	52
LITERATÚRA	54
ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK	56
ZOZNAM OBRÁZKOV	57
ZOZNAM TABULIEK	58
ZOZNAM PRÍLOH	59

ÚVOD

Radiácia je fyzikálny jav, pri ktorom dochádza k prenosu energie priestorom pomocou vĺn alebo častíc. Ionizujúca radiácia je druh radiácie, ktorá má dostatočnú energiu na to aby ionizovala atóm, na ktorý dopadá. Môže byť v podobe elektromagnetického žiarenia s frekvenčným spektrom za ultrafialovým žiarením, alebo v podobe častíc pohybujúcich sa veľkou rýchlosťou. Môžu to byť subatomárne častice ako elektróny a neutróny, alebo celé ióny a atómy. Radiácia sa vyskytuje všade okolo nás, väčšinou však v malých množstvách a s malou energiou, ktorá nedokáže atómy ionizovať.

Pre systémy, kde sú materiály vystavené veľkým dávkam radiácie alebo sú veľmi citlivé na ionizujúcu radiáciu, je potrebné pre zaručenie správneho fungovania urobiť istý druh radiačnej analýzy. Na základe analýzy sa vyhodnotí prípadná úprava dizajnu. Radiačná analýza je komplexná analýza, ktorá skúma množstvo radiácie, ktorému je skúmaný objekt vystavený. Môže si nájsť uplatnenie vo viacerých vedeckých odvetviach ako:

- Vesmírne misie
- Zdravotníctvo
- Armáda
- Rozsiahle počítačové systémy
- Jadrová energetika
- Letectvo

Najčastejšie sa uplatňuje pri vesmírnych misiách, pretože mimo magnetického poľa Zeme pôsobí na každé teleso veľké množstvo radiácie zo Slnka a preto, že pri vesmírnych misiách je dôležité zaručiť funkčnosť systémov. Táto práca sa bude venovať práve tomuto použitiu radiačnej analýzy.

Podľa konkrétnych požiadaviek pre vesmírnu misiu je potrebné vyhodnotiť vplyv niekoľkých efektov, definovaných v norme pre radiačnú analýzu vesmírnych misií. [1] Pri elektronických systémoch sa najčastejšie hodnotí vplyv troch efektov:

- Total Ionising Dose (TID)
- Displacement Damage (DD)
- Single Event Effect (SEE)

TID je dávka ionizujúceho žiarenia, ktorú súčiastka pohltí. Prejavuje sa vytváraním párov elektrón-diera v polovodičoch a nahromaďovaním náboja v ich izolačných vrstvách.

DD je kumulatívna porucha materiálu spôsobená narušením kryštálovej štruktúry polovodičov a niektorých optických materiálov nárazmi častíc. Táto porucha je problém hlavne pri polovodičoch, ktoré sa spoliehajú na prúd minoritných nosičov. Vzniká pôsobením neionizujúceho žiarenia (TNID).

SEE je efekt spôsobený interakciou jednotlivých častíc (protónov, neutrónov, alebo ťažkých iónov) s polovodičom. Môže mať vplyv na zlyhanie funkčnosti systému, v krajných prípadoch môže byť pre súčiastku deštruktívny. SEE sa vyhodnocuje špeciálne pre každý systém a je definovaný ako počet chýb v závislosti od energie žiarenia.

TID a DD sú na rozdiel od SEE kumulatívne poruchy a majú vplyv na väčšinu systémov. Táto práca sa zaoberá metódami počítania TID a TNID pre všeobecné prípady. Každá použitá súčiastka by mala mať meraním stanovenú hranicu množstva TID a TNID, ktorú dokáže zniesť. Táto hranica je dôležitá pri posudzovaní vypočítanej úrovne radiácie dopadajúcej na súčiastku.

1. TID ANALÝZA

Informácie nasledujúcej kapitoly sú prevzaté z príručky ECSS-E-HB-10-12A [2] založenej na platných normách ESA.

1.1 Úvod

TID (*Total ionising dose*) je dávka ionizujúcej radiácie, ktorú v mikroelektronike zariadenie pohltí. Tento jav sa prejavuje najčastejšie nahromadením priestorového náboja v izolačných vrstvách. Nahromadený náboj spôsobí postupnú degradáciu parametrov a eventuálne poruchu zariadenia. TID taktiež postihuje optické komponenty (ochranné sklá a optické vlákna) a pasívne materiály (plasty).

1.2 Definícia TID

TID je definovaná ako množstvo energie vytvorenej ionizáciou alebo excitovaním elektrónu a uloženej v jednotke hmoty.

$$D = \frac{\delta E}{\delta m} \text{ [Gy]} \quad (1.1)$$

Medzinárodná jednotka pre TID je gray: $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$. V literatúre sa stále používa aj staršia jednotka rad (radiation absorbed dose), $1 \text{ rad} = 0,01 \text{ Gy}$.

TID je závislá na materiáli, v ktorom sa absorbuje. Preto sa väčšinou jednotky udávajú v tvare: *rad(materiál)* alebo *Gy(materiál)*. Najčastejšie je TID udávaná v jednotkách *rad(Si)*.

1.3 Výpočet TID

Ak sa berie do úvahy, že energetické spektrum častice pri prechode materiálom sa výrazne nezmení, TID môže byť určená pomocou množstva nabitých častíc vstupujúcich do jednotky plochy povrchu materiálu (*fluence*) a brzdiacou energiou materiálu. Popisuje ju vzťah

$$D = \frac{1}{\rho} \int_{E_1}^{E_2} \psi(E) \frac{dE}{dx}(E) dE \text{ [Gy]}, \quad (1.2)$$

kde ρ je hustota materiálu, $\psi(E)$ je diferenčné energetické spektrum definované medzi E_2 a E_1 , dE/dx je brzdiaca energia materiálu vztiahnutá na jednotku vzdialenosti.

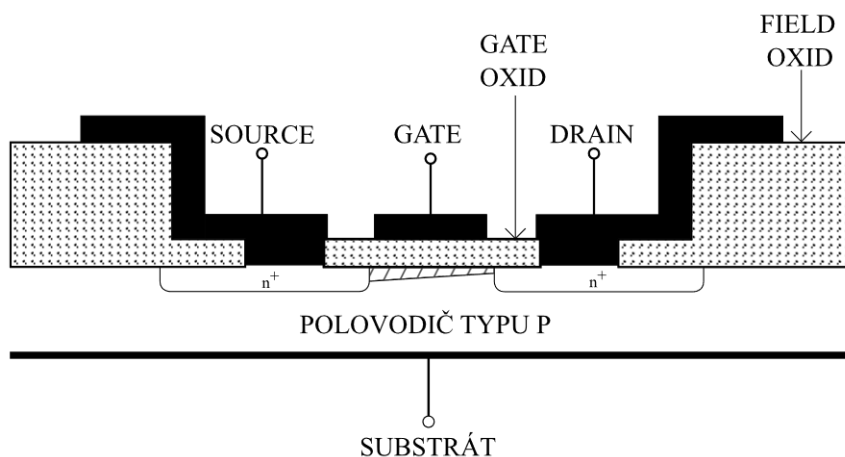
Pre výpočet TID sa najčastejšie používa program SHIELDOSE od spoločnosti NASA. Ten používa numerickú integráciu pre výpočet TID pomocou zadaných energetických spektier radiačných častíc a jednorozmerných hodnôt hrúbky materiálu. [3] Výstupom programu je takzvaná *Dose-Depth Curve* (DDC), inak povedané závislosť dávky radiácie od hrúbky materiálu. Program SHIELDOSE býva priamo integrovaný do

softwarov pre vyhodnocovanie vesmírnych misií ako napríklad SPENVIS alebo OMERE. Príklad DDC získaný programom OMERE je znázornený na obrázku 2.1.

1.4 Technológie citlivé na TID

V polovodičových zariadeniach produkuje ionizácia pár elektrón-diera vnútri samotného polovodiča alebo vnútri izolačnej vrstvy (napríklad vnútri oxidu). Časť z náboja vytvoreného touto ionizáciou uviazne vnútri izolačnej vrstvy. V MOS štruktúrach spôsobí vytvorený priestorový náboj posuv prahového napätia. Pretože je polarita náboja vytvoreného ionizáciou kladná, pri N MOSFET dochádza k zníženiu prahového napätia, čo môže spôsobiť, že sa MOSFET kanál nedokáže úplne zatvoriť. Pri P MOSFET naopak dochádza k zvýšeniu prahového napätia, čo má za následok horšie otváranie tranzistoru. Rýchlosť prepínania tranzistorov je taktiež znížená.

Ionizácia nepostihuje iba oxid medzi hradlom a kanálom, ale pri integrovaných štruktúrach aj takzvaný *field oxide*, ktorý oddeľuje jednotlivé tranzistory od seba. Tento náboj môže spôsobiť obrovské zvodové prúdy medzi tranzistormi ak je náboj dostatočne veľký, aby spôsobil inverziu polovodiča. Zlyhanie field oxidu sa často vyskytuje pri používaní komerčných CMOS zariadení. Štruktúra integrovaného MOSFET je znázornená na obrázku 1.1.



Obrázok 1.1 – Prierez štruktúry integrovaného NMOS tranzistoru.

V zariadeniach s bipolárnymi tranzistormi dochádza pri hromadení náboja v oxidových vrstvách k dvom efektom. Náboj zvyšuje povrchovú rekombináciu, čo má za následok zmenšený činiteľ β tranzistoru. Ak je náboj dostatočne veľký, môže vytvoriť inverzné pásmo v polovodiči P, čo má za následok zväčšenie plochy bázy zmenšujúc činiteľ β a zväčšujúc zvodové prúdy do bázy.

Pri bipolárnych tranzistoroch hrá úlohu aj takzvané ELDRS (*Enhanced Low-Dose-Rate Sensitivity*). Jedná sa o vlastnosť bipolárneho tranzistoru, kedy pri slabšom ožarovaní dochádza k rýchlejšej degradácii jeho parametrov. Pri silnom ožarovaní sa predpokladá rovnaký počet vytvorených dier ako pri slabšom ožarovaní, avšak pri silnom

ožarovaní sú z väčšej časti kompenzované vo forme dipólov. [4] Tento efekt vytvára značný problém, pretože laboratórne TID testy prebiehajú pri veľkých hodnotách TIDR. Testovanie pri malých dávkach podstatne zvyšuje čas a náklady. Naopak, MOS polovodiče sú postihované menej za jednotku TID pri nízkom TIDR testovaní a preto je potrebné správne vyhodnocovať analýzu pre jednotlivé súčiastky v systéme.

V optických materiáloch sa dlhodobé vystavenie ionizácii prejavuje primárne ako zväčšenie optickej absorpcie. Toto je väčšinou následkom nahromadovania náboja v už existujúcich defektoch v materiáli. Degradácia je preto veľmi závislá na prvotných vlastnostiach materiálu.

V kryštálových oscilátoroch alebo filtroch spôsobí dlhodobé vystavenie ionizácii veľké zmeny v rezonančnej frekvencii. Ako pri optických materiáloch je aj v tomto prípade posun veľmi závislý od použitého materiálu. Prírodný kryštál vykazuje najväčšie zmeny frekvencie, syntetický kryštál vykazuje menšie a syntetický kryštál vyčistený elektro difúziou vykazuje ešte menšie zmeny. Z toho vyplýva, že voľba kryštálu má podstatný vplyv na zmeny spôsobené ionizáciou.

Medzi zariadenia najviac postihnuté ionizáciou patria:

- **MOS zariadenia** – zmena prahového napätia, rýchlosť spínania, zvyšovanie zvodových prúdov
- **Bipolárne tranzistory** – degradácia činiteľa β hlavne pri malých prúdoch kolektorom, zvyšovanie zvodových prúdov
- **JFET** – zvyšovanie source-drain zvodových prúdov
- **Analógové obvody** – zmena offsetového napätia a prúdu, degradácia zisku
- **Digitálne obvody** – zvýšené zvodové prúdy tranzistorov, zlyhanie logiky ako následok zníženia zisku, zmeny prahového napätia a zmeny spínacej rýchlosti
- **Rezonančné kryštálové oscilátory** – zmeny rezonančnej frekvencie
- **Optické materiály** – zvýšená absorpcia, zmeny v absorpčnom spektre (zafarbenie)
- **Externé polymérové plochy** – degradácia pevnosti, zmeny v dielektrických vlastnostiach

Najcitlivejšie na TID sú aktívne elektronické prvky ako tranzistory a integrované obvody. Ich citlivosť hraničí s hodnotami TID od 10 Gy(Si) (1 krad(Si)) do 10 kGy(Si) (1 Mrad(Si)) v závislosti od použitej technológie.

2. VÝPOČTOVÉ METÓDY PRE TID A TNID ANALÝZY

Metódy pre počítanie a vyhodnotenie miery tienenia sú prebrané z normy ECSS-E-ST-10-12C [1]

Zo vzťahu (1.2) vyplýva, že množstvo radiácie je závislé od energetických spektier častíc a od hrúbky materiálu, ktorý musia častice prekonať. Tento materiál je označovaný ako tienenie (shielding). Pre správne vyhodnotenie radiácie je preto potrebné poznať detailné informácie o tienení systému.

Pre vyhodnocovanie množstva TID a TNID sú najčastejšie dva prístupy. Jedným z nich je približné stanovenie množstva radiácie so zanedbaním stochastických javov. Na základe údajov o brzdiacej sile jednotlivých spektier častíc a údajoch o hrúbke tienenia je možné približne určiť množstvo žiarenia, ktoré dané tienenie prekoná. Tento prístup nepredpokladá vedľajšie efekty použitých materiálov, medzi ktoré patrí aj ionizujúce žiarenie vytvorené sekundárnou radiáciou, ktoré môže mať značný vplyv napríklad pri používaní tenkých vrstiev tienenia. Druhý prístup berie do úvahy látkové zloženia všetkých použitých materiálov tienenia a skutočné interakcie protónov, neutrónov a elektrónov s atómovými mriežkami. Najčastejšie sa vykonáva pomocou 1-D, 2-D alebo 3-D Monte Carlo simulácie. Trojrozmerné Monte Carlo simulácie sú ale veľmi výpočtovo náročné, čo môže návrhára viesť k použitiu jednoduchšieho prístupu, ktorý je väčšinou dostačujúci. Pre zrýchlenie Monte Carlo simulácií vyvinula spoločnosť TRAD software, ktorý počíta radiáciu pomocou spätnej Monte Carlo simulácie namiesto doprednej.

Postup pri vyhodnocovaní radiačnej analýzy systému je nasledovný:

- Prvotný odhad množstva radiácie sa uskutoční pre najmenšie množstvo tienenia v geometrii (*worst case*) na základe zjednodušenia popísaného v kapitole 2.1. Pokiaľ množstvo radiácie vrátane sekundárneho žiarenia nepresahuje stanovenú hranicu, nie je potrebné robiť ďalšie analýzy.
- Ak táto podmienka nie je splnená, je potrebné uskutočniť detailnú sektorovú analýzu (kapitola 2.2, 2.3).
- V prípade použitia vrstveného tienenia, výskytu ťažkých kovov v blízkosti skúmaného polovodiča alebo možnej dávky röntgenového brzdného žiarenia v oblasti tienenej tantalom, je potrebné tieto javy správne vyhodnotiť. Medzi ťažké kovy patrí napríklad zlato, hafnium alebo volfrám. Pretože sektorové analýzy nemajú vo výpočte tieto fyzikálne efekty zahrnuté, je potrebné buď vyhodnocovať výsledky dostatočne konzervatívne, alebo vyhodnotiť radiáciu na základe detailného transportného modelu, ktorý zahŕňa presné charakteristiky použitých materiálov. Môže sa jednať napríklad o 3D Monte Carlo simulácie.

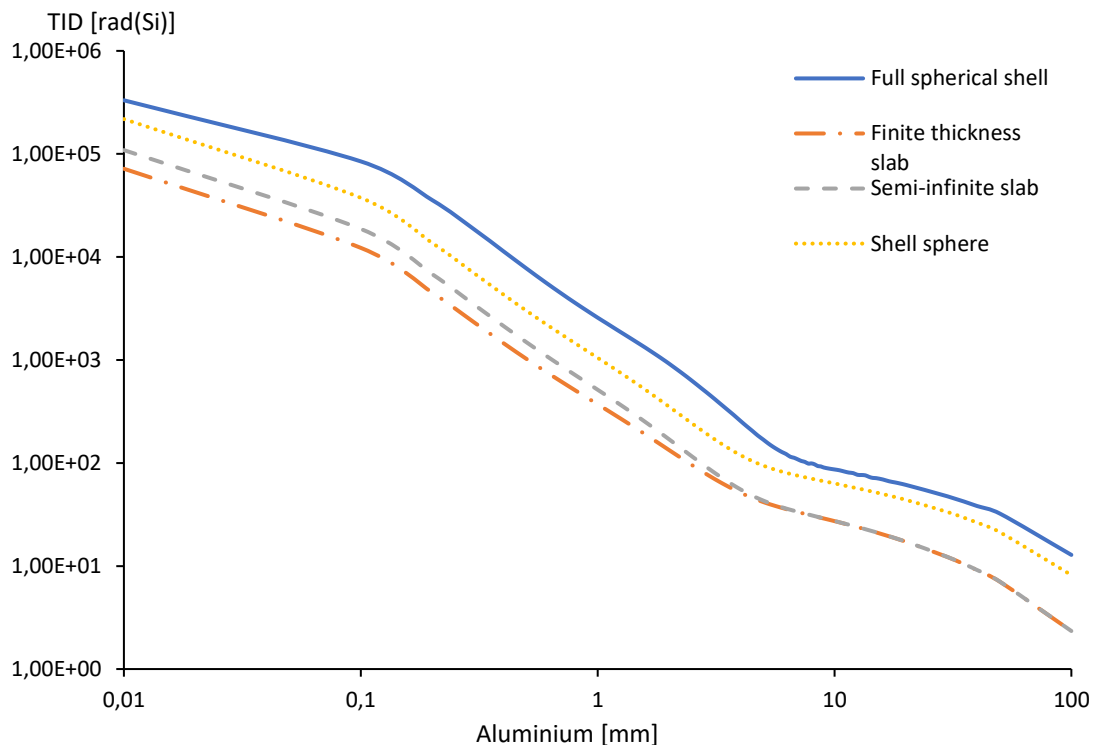
2.1 Zjednodušenie pomocou plošných a sférických geometrií

Pri vyhodnotení množstva radiácie sa predpokladá, že špecifické materiálové vlastnosti nehrajú rolu v množstve dopadajúceho žiarenia a jednotlivé materiály sa dajú podľa hustoty prepočítať na materiál ako hliník.

Geometria v okolí skúmanej súčiastky sa aproximuje na jednu z geometrií uvedených v tabuľke 2.1.

Následne sa pre danú geometriu zistí správna krivka DDC (kapitola 1.3), alebo podobná informácia o toku častíc v závislosti od hrúbky materiálu. Príklad takejto krivky je zobrazený na obrázku 2.1.

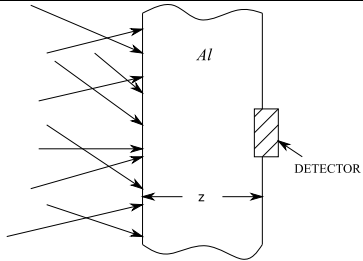
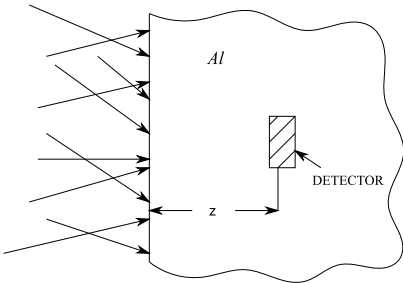
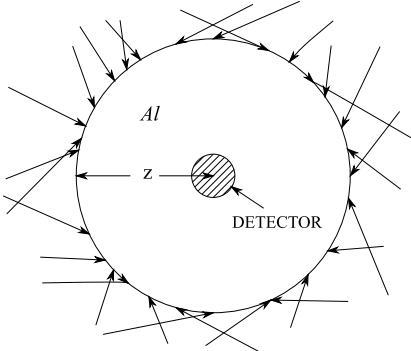
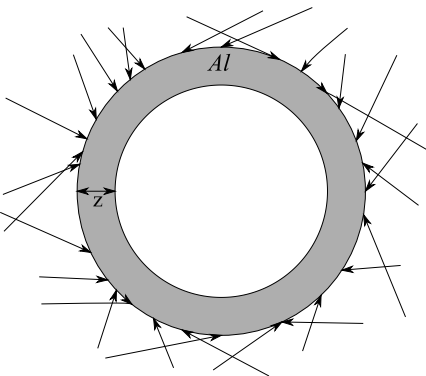
Podľa najmenšej hodnoty tienenia poskytnutej vesmírnou družicou je stanovená najväčšia dávka radiácie. Pokiaľ skúmaný systém pracuje pri tejto hodnote radiácie správne, je analýza vyhodnotená ako prijateľná. Pokiaľ táto požiadavka nevyhovuje, alebo nie je možné jednoznačne určiť najmenšiu hodnotu tienenia, je požadovaná komplexnejšia analýza popísaná v ďalších bodoch.



Obrázok 2.1 – TID definovaná pre 4 elementárne geometrie.

Na obrázku 2.1 je znázornená *Dose-Depth-Curve* v štyroch hliníkových elementárnych geometriách. Plné čiary reprezentujú výsledky pre plné sférické tienenie, bodkovaná krivka znázorňuje prázdne sférické tienenie s vnútorným polomerom 100 mm, čiarkovaná krivka znázorňuje semi-nekonečný plát a krivka čiarkovano-bodkovaná znázorňuje konečný plát. Krivky sú vypočítané s pomocou simulačného programu OMERE pre vesmírnu misiu na orbite LEO2. Špecifikácia zadanej misie je v prílohe B.

Tabuľka 2.1 – 4 elementárne geometrie pre vyhodnotenie dávky radiácie.

Geometria tienenia	Popis tienenia		Aplikácia
Konečný plát	Izotropické, na priestorovom uhle 2π steradiánov		Používa sa na výpočet tienenia komponentov na aktívnych anténach
Semi-nekonečný plát	Izotropické, na priestorovom uhle 2π steradiánov		Používa sa na výpočet radiačnej dávky na komponenty pri povrchu SC (väčšina SC má nekonečné tienenie v uhle cez 2π steradiány)
Plné sférické tienenie	Izotropické, na priestorovom uhle 4π steradiánov		Používa sa v podmienkach, kedy je komponent rovnako konečne tienený vo všetkých okolitých uhloch (najčastejšia geometria pre určovanie <i>dose-depth curve</i> sektorovej analýzy)
Prázdne sférické tienenie	Izotropické, na priestorovom uhle 4π steradiánov v prázdnej sfére so zadanou hrúbkou		Používa sa pre komponenty s konečnou mierou tienenia vo všetkých uhloch a niekedy v sektorových analýzach. (často je problém určiť vnútorný priemer dostatočne presne)

2.2 Detailná sektorová metóda

Pri tejto analýze sa rovnako ako pri predošlej predpokladá, že špecifickosť materiálových vlastností je zanedbateľná a hodnota radiácie môže byť prepočítaná hustotou z hodnôt radiácie pre iný materiál, najčastejšie hliník.

Pri tomto postupe sa rozdelí prostredie v okolí skúmaného bodu do konečného počtu sektorov. Každý sektor má zadaný priestorový uhol Ω_i a dávku radiácie určenú na základe zjednodušenia podľa tabuľky 2.1. Predpokladom tejto analýzy je, že sa priestorové uhly sektorov neprekrývajú, a ich súčet je rovný celkovému uhlu 4π . Celková dávka radiácie je potom rovná

$$Dose = \sum_{i=1}^N \frac{\Omega_i}{4\pi} D(t_i), \quad (2.1)$$

kde $D(t_i)$ predstavuje dávku radiácie pre jednotlivý sektor a Ω_i hodnotu priestorového uhlu, ktorý daný sektor predstavuje.

$$\sum_{i=1}^N \Omega_i = 4\pi \quad (2.2)$$

Pri tomto druhu analýzy sa musí výpočet opakovať pre každý zisťovaný bod, pretože priestorové uhly sú závislé od polohy skúmaného bodu. Na obrázku 2.3 je znázornený sektorový model analýzy zjednodušený do 2 rozmerov.

V ďalšom kroku je pre jednotlivé sektory prepočítaná hrúbka materiálu, podľa ktorej je odčítaná dávka radiácie z DDC definovanej pre jednu z elementárnych geometrií.

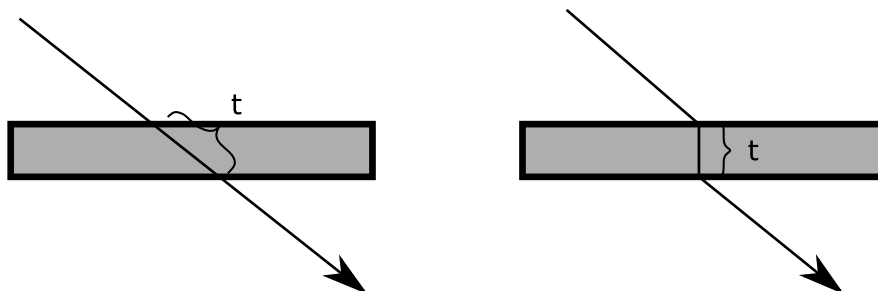
Pre výpočet hrúbky materiálu sa používajú dve metódy:

- **SLANT**
- **NORM**

Metóda **SLANT** predpokladá trajektóriu častíc ako priamku pri prechode materiálom. Tento prístup je vhodný hlavne pre vyhodnotenie trajektórie častíc ako sú protóny, ióny alebo gama žiarenie. Pre dosiahnutie dostatočne konzervatívnych výsledkov sa pri tejto metóde určuje krivka DDC ekvivalentná geometrii plného sférického tienenia.

Metóda **NORM** počíta trajektóriu častice ako normálu na povrch materiálu. Tento prístup lepšie popisuje dráhu elektrónov, ktoré sú značne ovplyvnené viacnásobným rozptylom v materiáli. Pri použití tejto metódy sa určuje krivka DDC ekvivalentná geometrii prázdneho sférického tienenia.

Grafické porovnanie týchto dvoch metód je zobrazené na obrázku 2.2.



Obrázok 2.2 – Hrúbka materiálu pri metóde SLANT (vľavo) a NORM (vpravo)

2.2.1 Príklad počítania detailnej sektorovej analýzy

Príklad bol prevzatý z normy ESA PSS-01-609 Issue 1 [5]

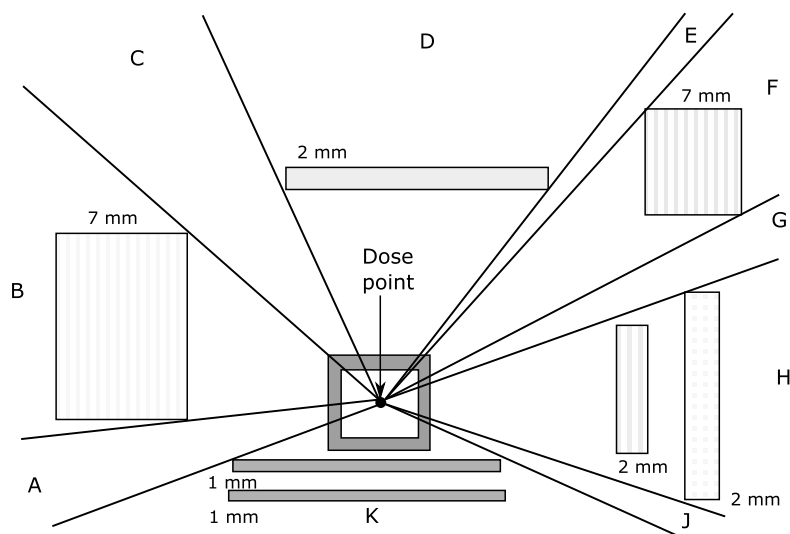
Tento problém je popísaný pre malý integrovaný CMOS logický obvod vnútri systému použitom v 3-osovom stabilizovanom komunikačnom satelite s požadovanou dĺžkou životnosti 7 rokov.

Súčiastka je vo vnútri hliníkovej krabice 1-2 mm hrubej. Krabica leží na platforme, ktorej materiálový ekvivalent zodpovedá 1 mm hliníku. Krabica je ďalej zo strán tienená ďalšími krabicami s materiálovými ekvivalentmi rovnými viac ako 7 mm hliníku.

Ďalšie potrebné dáta pre uskutočnenie analýzy sú:

- Radiácia vo vonkajšom prostredí
- Kritéria elektrického obvodu pre zistenie maximálnej dovolenej degradácie
- Zjednodušený model reakcie CMOS na radiáciu

Na výpočet dávky žiarenia sa najprv vypočíta tienenie prázdnej sféry, ktorá predstavuje tienenie hliníkovej krabice. Následne sa sektorovo vypočíta vplyv tienenia krabíc v okolí. Zjednodušený náčrt sektorového modelu je znázornený na obrázku 2.3.



Obrázok 2.3 – Dvojrozmerné znázornenie rozdelenia geometrie na 10 sektorov.

Radiácia vonkajšieho prostredia je prevzatá z databázy UNIRAD, ktorá je integrovaná v programe SHIELDOSE. Krivka dávky žiarenia DDC sa určí simuláciou v programe SHIELDOSE [3] na základe tokov častíc v priestore, ktoré sú závislé od parametrov ako trajektória misie, dĺžka trvania misie a časové obdobie.

Sektorový model sa v tomto prípade počíta ako súčet množstiev žiarenia vynásobený príslušným podielom priestorového uhlu, ktorý predstavuje. Výsledná dávka radiácie je daná vzťahom (2.3)

$$Dose = \sum_{i=1}^N \frac{\Omega_i}{4\pi} D(t_i), \quad (2.3)$$

kde Ω_i predstavuje priestorový uhol a $D(t_i)$ predstavuje DDC funkciu. Pre tento vzťah sa predpokladá, že súčet všetkých priestorových uhlov je rovný 4π .

Tabuľka 2.2 – Výsledné hodnoty radiácie z príkladu normy ESA PSS-01-609

	Hrúbka hliníku [mm]	Podiel priestorového uhlu k 4π	7-ročná dávka [krad(Si)]		Hrúbka hliníku [mm]	Podiel priestorového uhlu k 4π	7-ročná dávka [krad(Si)]
A	3	0,04	2,4	F	10	0,07	0,14
B	10	0,12	0,24	G	3	0,02	1,2
C	3	0,08	4,8	H	7	0,10	0,3
D	5	0,15	0,9	J	3	0,01	0,6
E	3	0,01	0,6	K	5	0,40	2,4

Celková dávka: 13,6 krad(Si) za 7 rokov.

2.3 Ray trace metóda

Ray trace metóda používa podobné postupy ako detailná sektorová analýza. U Ray trace metódy sa ale nerozdeľuje samotná geometria, ale pohľad detektoru sa rozdelí na rovnomerne rozložené sektory celkového priestorového uhlu. Aby mohla byť úroveň radiácie správne vyhodnotená, musí sa priestor z analyzovaného bodu rozdeliť na minimálne 1800 rovnomerne rozložených sektorov.

Cez každý sektor je vyslaný z analyzovaného bodu lúč, ktorý predstavuje trajektóriu pomyselnej častice. V tomto prípade sa predpokladá rovná trajektória, takže sa jedná o metódu SLANT. (obrázok 2.2) Následne sa vypočíta dráha lúču vnútom materiálu. Celková dráha každého lúču je potom prepočítaná pomocou DDC ekvivalentnej plnému sférickému tieneniu na dávku radiácie. Špecifickosť materiálov sa aj pri tejto metóde zanedbáva, takže dráhy lúčov vnútri iných materiálov ako hliník sú prepočítané na ekvivalentnú hrúbku tienenia hliníkom. V prípade, že každý sektor predstavuje rovnaký priestorový uhol, je výsledná dávka len vydelená počtom vyslaných lúčov.

$$Dose = \sum_{i=1}^N \frac{1}{N} D(t_i) \quad (2.4)$$

V opačnom prípade sa musí prepočítat pomocou jednotlivých priestorových uhlov. (2.3)

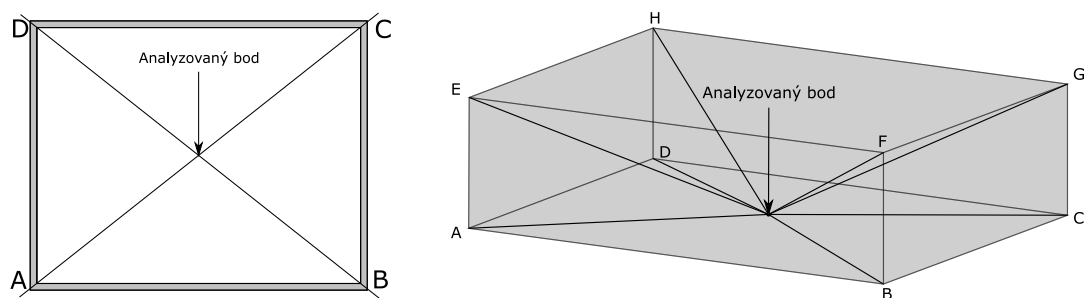
3. IMPLEMENTÁCIA SEKTOROVEJ METÓDY

V nasledujúcej kapitole bude popísaná metóda implementácie sektorovej analýzy, v ktorej je geometrický model tieniacej skrinky aproximovaný do jednoduchých sektorov definovaných priestorovými uhlami, podobne ako je definovaný model zobrazený na obrázku 2.3 v dvoch rozmeroch.

Táto implementácia si vyžaduje, aby používateľ zadal jednotlivé sektory analyzovaného objektu. Pretože vo väčšine prípadov tienenia sa jedná o istý druh skrinky v podobe kocky alebo kvádra, je často výhodné rozdeliť danú geometriu na sektory, kde každý sektor predstavuje jednu stenu skrinky. Geometria sa zadáva len s hodnotami šírky, dĺžky a výšky skrinky. Každý sektor je ešte definovaný hrúbkou steny, ktorú pokrýva. Tá sa môže určiť ako najmenšia hrúbka tienenia pre konzervatívne výsledky, prípadne to môže byť priemerná hrúbka.

3.1 NORM model

Model skrinky je zjednodušený do šiestich sektorov $ABCD$ až $EFGH$. Každý sektor predstavuje jednu zo stien kvádra a je popísaný hrúbkou steny a súradnicami bodov obdĺžniku. Na obrázku 3.1 je rozdelenie znázornené v 2D a 3D.



Obrázok 3.1 – Rozdelenie geometrie v tvare skrinky na 6 sektorov.

Detektor, pre ktorý je geometria analyzovaná, je zadaný ako bod $O[o_x, o_y, o_z]$, ktorý je umiestnený vnútri skrinky. Priestorový uhol každého sektoru je určený ako projekcia danej steny na jednotkovú sféru, ktorej stred predstavuje analyzovaný bod. (obrázok 3.2)



Obrázok 3.2 – Obdĺžnik premietnutý na jednotkovú guľu.

Na jednotkovej sfére sa projekciou vytvorí sférický štvoruholník, pre ktorý platia vzťahy [(3.1), (3.2), (3.3)]. Plocha sférického štvoruholníka na jednotkovej sfére je rovná jeho priestorovému uhlu.

Plocha jedného sférického polygónu je určená podľa [6] (kapitola VIII) ako

$$\Sigma - (n - 2)\pi r^2, \quad (3.1)$$

kde n je počet strán polygónu a Σ je súčet sférických uhlov.

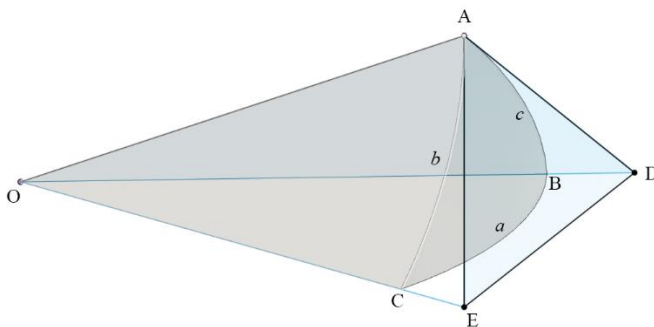
Pre štvoruholník preto platí vzťah:

$$(A + B + C + D - 2\pi)r^2 \quad (3.2)$$

Sférický uhol polygónu je podľa [6] (kapitola IV) určený ako uhol sférického trojuholníka:

$$\cos(A) = \frac{\cos(a) - \cos(b)\cos(c)}{\sin(b)\sin(c)}, \quad (3.3)$$

kde A predstavuje uhol EAD podľa obrázku 3.3, pričom úsečky AE a AD tvoria dotyčnice ku kružniciam so stredom O .



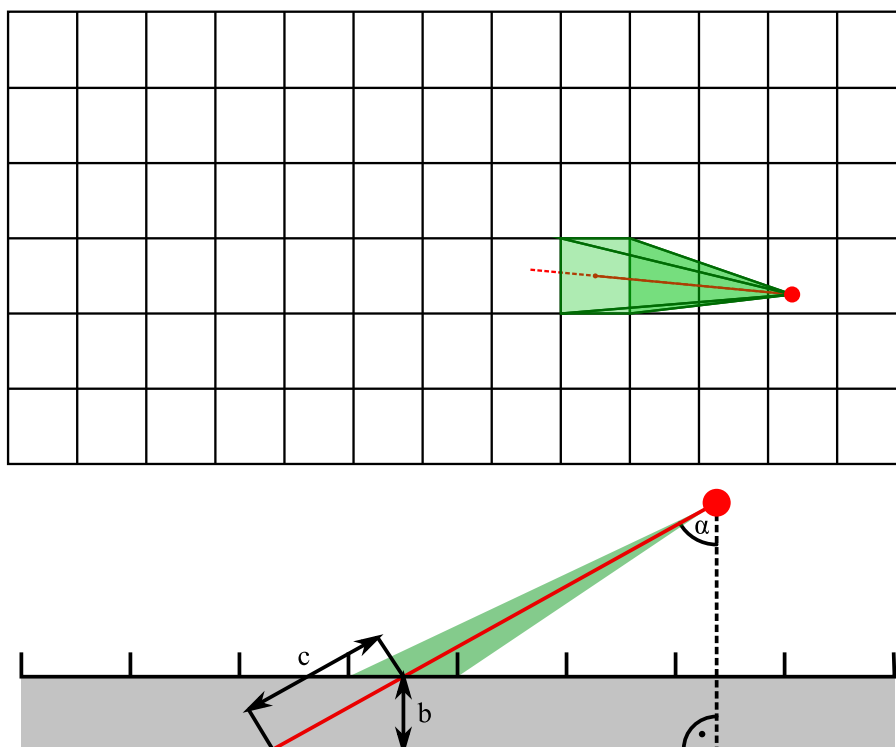
Obrázok 3.3 – Znázornenie uhlu A sférického trojuholníku.

Pre každý sektor (stenu skrinky) je hodnota priestorového uhlu vynásobená množstvom radiácie. Radiácia každého sektoru je určená hrúbkou danej steny. Môže sa jednať o najtenšie miesto v tienení skrinky pre konzervatívne výsledky. DDC pre metódu

NORM musí byť ekvivalentná DDC prázdneho sférického tienenia (Tabuľka 2.1) V prípade, že sa skrinka nachádza v satelite, ktorého množstvo tienenia je zadané v špecifikácii projektu, je potrebné túto hrúbku tienenia ku každému sektoru pripočítať. Ak je skrinka z iného materiálu ako hliník, musia byť jej steny prepočítané na ekvivalentnú hrúbku hliníku.

3.2 SLANT model

Pri SLANT modeli je každý zo šiestich sektorov (obrázok 3.1) ešte rozdelený na štvorcovú sieť menších sektorov s čo najväčším rozlíšením. Pre každý štvorcový sektor musí byť podobne ako pri NORM modeli vypočítaný priestorový uhol zo štyroch bodov, ktoré tvoria dané oko siete. Množstvo tienenia je v tomto prípade určené hrúbkou steny, ktorou musí častica preletieť. Tá je vypočítaná goniometrickými funkciami z polohy analyzovaného bodu voči danému štvorcu a normálovej hrúbke steny. (obrázok 3.4)



Obrázok 3.4 – Grafické znázornenie SLANT metódy sektorovej analýzy.

Dĺžka dráhy častice pre jednotlivé body siete je jednoducho určená ako

$$c = \frac{b}{\cos \alpha} \quad (3.4)$$

Pretože metóda neberie do úvahy rohy skrinky, je dôležité pre konzervatívnosť výsledku zadávať do výpočtu vonkajšie rozmery skrinky.

Pre každý sektor (oko siete) je vynásobená hodnota priestorového uhlu radiáciou odčítanou z DDC v hodnote, ktorá predstavuje dĺžku c (obrázok 3.4). Ostatné pravidlá platia rovnako ako pri NORM modeli.

4. IMPLEMENTÁCIA RAY TRACE METÓDY

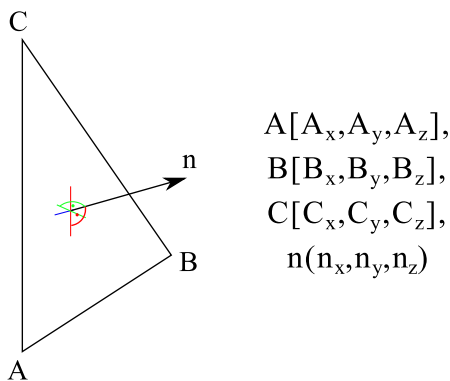
V tejto kapitole bude opísaný postup pre realizáciu vlastnej verzie Ray trace analýzy. Hlavný zámer tejto implementácie bolo vytvorenie algoritmu, ktorý dokáže pracovať s ľubovoľnou geometriou, ktorá je zadaná bežným spôsobom a je tak kompatibilná s modelovacími softwarom. Vytvorený algoritmus musí zároveň dodržiavať všetky pravidlá analýzy stanovené normou.

V kapitole 4.1 je popísaný princíp počítania dráh lúčov jednotlivých sektorov. V kapitole 4.2 je rozoberaná problematika rovnomerného rozloženia lúčov. V kapitole 4.3 sú popísané pravidlá pre prepočet získaných dráh na radiáciu.

4.1 Popis geometrie

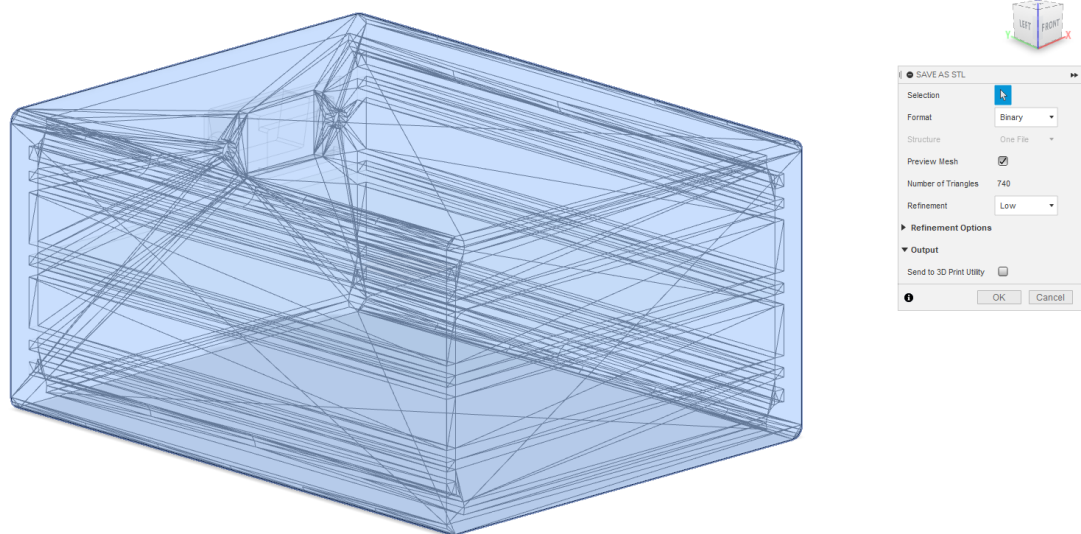
Hlavný problém pri implementácii bol prevod 3D objektu vo forme, na ktorej by sa dali geometricky určiť priesečníky s lúčmi. Na základe priesečníkov je následne možné vypočítať dĺžku trajektórie lúču vnútri materiálu. Formát STL je zaužívaný formát trojrozmerných objektov. Používajú ho napríklad aj 3D tlačiarne, takže ho dokáže exportovať skoro každý modelovací software. Jedná sa o formát, v ktorom je geometria popísaná pomocou povrchovej siete trojuholníkov. Každý trojuholník je zadaný tromi bodmi a normálovým vektorom, zapísanými vo forme súradníc v trojrozmernom karteziánskom systéme. [7]

Na obrázku 4.1 je zobrazený jeden trojuholník s informáciami extrahovanými zo súboru STL.



Obrázok 4.1 – Štruktúra popisu trojuholníkov v súbore formátu STL.

Na obrázku 4.2 je zobrazený program Autodesk Fusion™, v ktorom je exportovaný objekt vymodelovanej skrinky pri nastavení nízkej kvality povrchovej siete trojuholníkov. Kvalita siete ovplyvňuje počet trojuholníkov použitých na vykreslenie geometrie. Počet trojuholníkov bude následne ovplyvňovať výpočtovú náročnosť pri tejto metóde.



Obrázok 4.2 – Export STL siete hliníkovej skrinky z programu Autodesk Fusion™

Detektor, pre ktorý je geometria analyzovaná, je zadany ako bod $O[O_x, O_y, O_z]$. Súradnice detektoru musia byť v rovnakých jednotkách, v ktorých bol súbor STL exportovaný.

Následne je pre tento bod zvolený smerový vektor $u(u_x, u_y, u_z)$, ktorý je určený ako jeden z n vektorov, rozdelených rovnomerne v priestorovom uhle 4π .

Bod O a smerový vektor u určujú priamku v priestore parametricky popísanú ako

$$\begin{aligned} x &= O_x + u_x t \\ y &= O_y + u_y t \\ z &= O_z + u_z t \end{aligned} \quad (4.1)$$

Následne je pre každý trojuholník zadanej geometrie analyticky spočítané, či daná priamka prechádza vnútorným trojuholníkom. Ak priamka trojuholníkom prechádza, tento bod je považovaný za bod, kde lúč buď vstupuje alebo vystupuje z materiálu. Musí preto pre každý lúč platiť, že počet priesečníkov je párny.

Pretože je potrebné overiť pre každý lúč či prechádza každým trojuholníkom, je výpočtový čas závislý od počtu použitých lúčov a počtu trojuholníkov v danom trojrozmernom modeli.

Po zistení všetkých priesečníkov získame vzdialenosť, ktorú lúč prešiel vnútro materiálu ako súčet vzdialeností dvojíc priesečníkov. Výsledná vzdialenosť je hrúbka materiálu, ktorou musia častice prejsť, ak letia v smere vektoru.

4.2 Rozloženie lúčov

Podľa normy ECSS-E-ST-10-12C, sekcia 6.2.3a8 [1] je potrebné rovnomerne rozdeliť minimálne 1800 lúčov v priestorovom uhle 4π . Rovnomerne rozložené body na guli je známy matematický problém, ktorý je pre veľký počet bodov momentálne nevyriešený.

Ako prvý sa týmto problémom zaoberal fyzik Thomson, po ktorom je tento problém pomenovaný. Thomson sa snažil zistiť optimálne energetické rozloženie elektrónov v takzvanom pudingovom modeli atómu. Rovnováha systému nastáva ak sa Coulombove sily vyrovnajú. Ak sa v systéme nachádza iba malý počet elektrónov, stačí dať do rovnosti Coulombove rovnice. So zvyšujúcim počtom elektrónov sa ale výrazne zväčšuje veľkosť matice rovníc až dokým nie je možné aj za pomoci dnešných počítačov presné usporiadanie elektrónov vypočítať. Na približne optimálne usporiadanie sa používajú numerické simulačné metódy.

Usporiadanie rovnomerne rozložených bodov na guli vytvára špecifické geometrické útvary. Dva body vytvárajú úsečku veľkosti priemeru gule, tri body vytvárajú trojuholník, štyri body vytvárajú štvorsten. Známe usporiadania od $N = 1$ do $N = 32$ elektrónov je možné vidieť na stránke Kevina Browna. [8]

Podobnou problematikou sa zaoberal aj Álvaro González v článku Measurement of Areas on a Sphere Using Fibonacci and Latitude–Longitude Lattices [9]. Tento článok sa zaoberá výpočtom sférickej plochy numerickou metódou počítania bodov rovnomerne rozložených na sfére. V článku je porovnaná metóda rozloženia bodov pomocou krokovania uhlových súradníc a rozloženia pomocou Zlatej špirály. Pri krokovaní uhlových súradníc dochádza k zhusteniu bodov v okolí pólův gule, čo vytvára nehomogenitu. Zlatá špirála používa ku krokovaniu uhlu hodnotu Zlatého rezu

$$\Phi = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{F_{n+1}}{F_n} = \frac{1 + \sqrt{5}}{2}, \quad (4.2)$$

ktorý je rovný pomeru dvoch nasledujúcich členov Fibonacciho postupnosti v nekonečne. Toto číslo sa považuje za najviac iracionálne číslo, vďaka čomu môže byť rozmiestnenie bodov touto metódou považované za veľmi nesymetrické. V spomenutom článku bolo porovnanie týchto dvoch metód uskutočnené metódou Monte Carlo, v ktorej pre náhodnú plochu a umiestnenie sférického dómu bola porovnaná skutočná plocha dómu s numericky vypočítanou plochou. Plocha sa numericky vypočíta ako súčet plôch, ktoré predstavujú body uložené vnútri analyzovaného dómu. Výpočet bol uskutočnený pre počty bodov $n = 100 \div 10^6$. Pre všetky hodnoty vykazovalo lepšie výsledky rozloženie pomocou Zlatej špirály.

Pre účely rozloženia skúmaných lúčov radiačnej analýzy je dôležité aby boli lúče rovnomerne rozmiestnené a aby každý lúč predstavoval približne rovnaký priestorový uhol. Pre vyhodnotenie vhodnosti rozloženia bodov bol stanovený predpoklad, že najrovnomernejšie rozloženie bodov nastáva pri dosiahnutí čo najväčšej vzdialenosti

medzi každými dvoma susednými bodmi. Tomuto sa hovorí Thammesov problém a jedná sa o zjednodušenú verziu Thomsnovo problému. [10]

4.2.1 Porovnanie rozložení

Táto kapitola sa zaoberá efektivitou rôznych rozložení lúčov. Medzi porovnávané metódy patria metódy popísané v príručke radiačnej analýzy [2] a ich pozmenené verzie, metóda Zlatej špirály [8] a upravená metóda Zlatej špirály [11].

Všetky metódy boli vyhodnotené na základe grafického znázornenia rozloženia a na základe najmensej vzdialenosti medzi susednými bodmi [10] a priemernej vzdialenosti bodov ako

$$\begin{aligned}\delta(X_N) &:= \max \left(\min_{1 \leq i < j \leq N} \|x_i - x_j\| \right), \\ \overline{\delta(X_N)} &:= \frac{\sum_{i=1}^N \left(\min_{1 \leq i < j \leq N} \|x_i - x_j\| \right)}{N},\end{aligned}\tag{4.3}$$

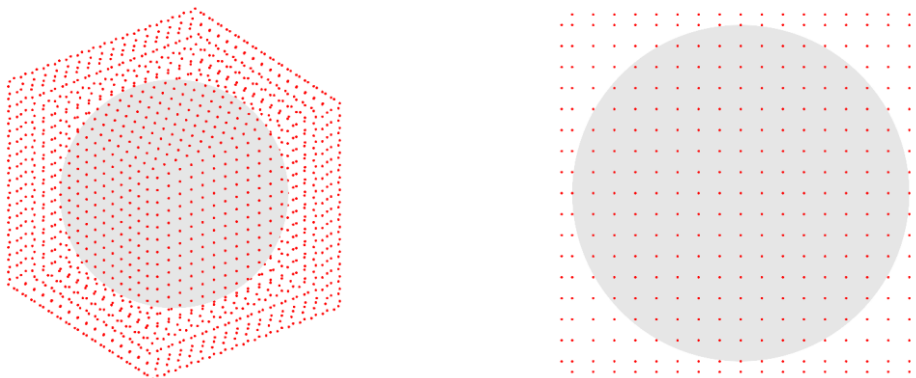
kde x predstavuje bod na povrchu gule.

Čím je väčšia vzdialenosť $\delta(X_N)$ a $\overline{\delta(X_N)}$, tým sú body lepšie rozložené. Táto vzdialenosť je samozrejme závislá aj od počtu rozložených bodov a s narastajúcim počtom bodov sa znižuje.

A. Štvorcové siete bodov na stenách kocky

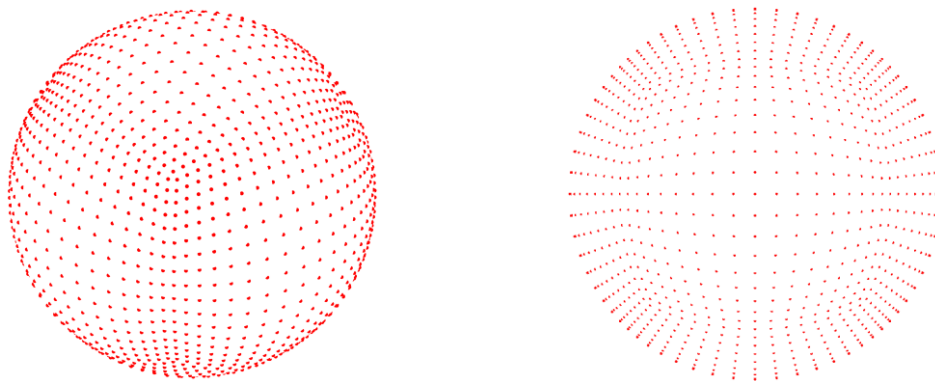
Toto je jeden z odporúčaných spôsobov pre rozloženie bodov. V tomto prípade sú lúče rozmiestnené podľa siete bodov na povrchu kocky v okolí analyzovaného bodu ako je znázornené na obrázku 4.3. Počet bodov je daný rozlíšením jednej steny kocky. ($n \times n \times 6$) Pre jednu stenu kocky platí $i, j \in \langle -\frac{n}{2}, \frac{n}{2} \rangle$

$$x_{i,j} = i \qquad y_{i,j} = j \qquad z_{i,j} = -\frac{n}{2} \tag{4.4}$$



Obrázok 4.3 – Rozmiestnenie lúčov podľa stien obklopujúcej kocky.

Na obrázku 4.4 je zobrazené toto rozloženie s premietnutými bodmi na guľu, aby mohlo byť toto rozloženie porovnané s ostatnými.



Obrázok 4.4 – Rozmiestnenie lúčov podľa stien obklopujúcej kocky.

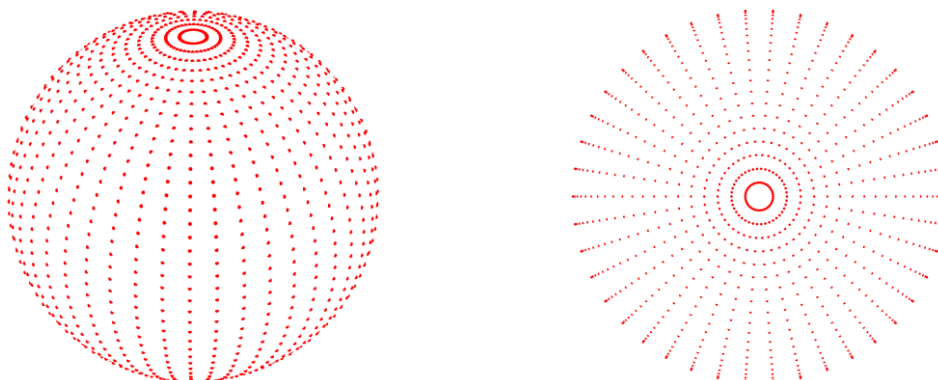
Pri tomto druhu rozloženia dochádza k väčšiemu zhutňovaniu bodov v oblasti rohov kocky. Najmenšia vzdialenosť dvoch susedných bodov pri rozmiestnení 1734 bodov je rovná $\delta(X_{1734}) = 4,997 \cdot 10^{-2}$

B. Krokovanie uhlových súradníc

Druhé odporúčané rozloženie spočíva v krokovaní uhlových súradníc. Princípom tohto rozloženia je, že sa vytvorí sieť $n \times n$ bodov, kde n predstavuje počet bodov na jednej rovnobežke a jednom poludníku. Súradnice bodov sú dané rovnicami

$$\text{lat}_{i,j} = \frac{i}{n} \cdot 2\pi, \quad \text{lon}_{i,j} = \frac{j-1}{n} \cdot \pi - \frac{\pi}{2} \quad (4.5)$$

Zobrazené rozloženie je upravené tak, aby neobsahovalo množinu bodov priamo na póloch.



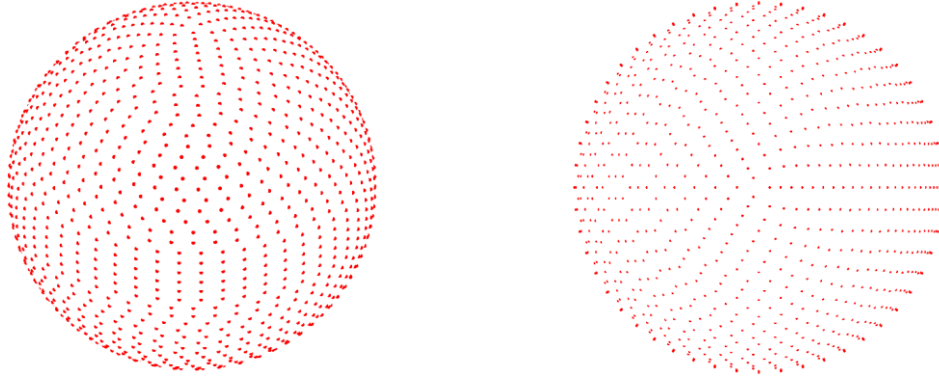
Obrázok 4.5 – Rozloženie bodov pomocou krokovania uhlových súradníc.

Z grafického znázornenia je zjavné, že v oblasti pólů tejto sféry dochádza k zhutňovaniu bodov. Aby sa predišlo chybe pri výpočte, musia byť body bližšie k pólom pripočítané s menšou váhou (menším priestorovým uhlom) ako ostatné body. Stále je však prepočítané tienenie pri pólach detailnejšie na úkor ostatných strán. Najmenšia vzdialenosť dvoch susedných bodov pri rozmiestnení 1722 bodov je rovná $\delta(X_{1722}) = 1,117 \cdot 10^{-2}$

C. Krokovanie uhlových súradníc podľa kosínusu zemepisnej šírky

Tento druh krokovania je podobný ako predošlé, ale počet bodov na jednej rovnobežke má kosínusovú závislosť od zemepisnej šírky. Týmto sa dosiahne, že na pólach nebude taká veľká hustota bodov, a body budú lepšie rozložené.

$$\begin{aligned} \text{lat}_{i,j} &= \frac{i}{\cos(\text{lon}_j) \cdot n} \cdot 2\pi & \text{lon}_{i,j} &= \frac{j}{n} \cdot \pi - \frac{\pi}{2} \end{aligned} \quad (4.6)$$



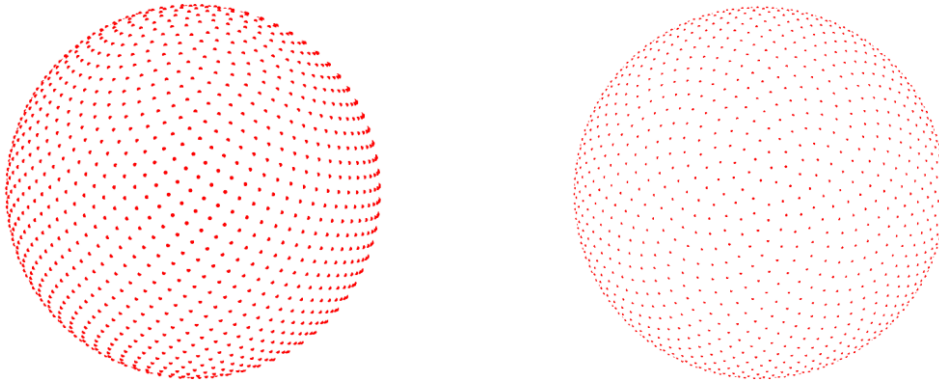
Obrázok 4.6 – Rozloženie bodov s kosínusovou závislosťou.

Takto upravené rozloženie už na prvý pohľad vyzerá rovnomernejšie. Najmenšia vzdialenosť dvoch susedných bodov pri rozmiestnení 1764 bodov je rovná $\delta(X_{1764}) = 5,927 \cdot 10^{-2}$

D. Zlatá špirála

Metóda Zlatej špirály je už dlhšie známa metóda rýchleho a rovnomerného rozloženia bodov na sfére. Používa sa napríklad v počítačovej grafike, alebo dokonca v satelitnej technike. Oproti iným metódam dosahuje rovnomernejšie rozloženie bodov bez nárastu výpočtovej náročnosti. Súradnice rozloženia n bodov sú dané rovnicami

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{\sqrt{5} + 1}{2}, & \phi^{-1} &= (\phi - 1) \cdot 2\pi, \\ \text{lat}_i &= \sin^{-1} \left(1 - \frac{2i}{n+1} \right), & \text{lon}_i &= \Phi^{-1} \cdot i \end{aligned} \quad (4.7)$$



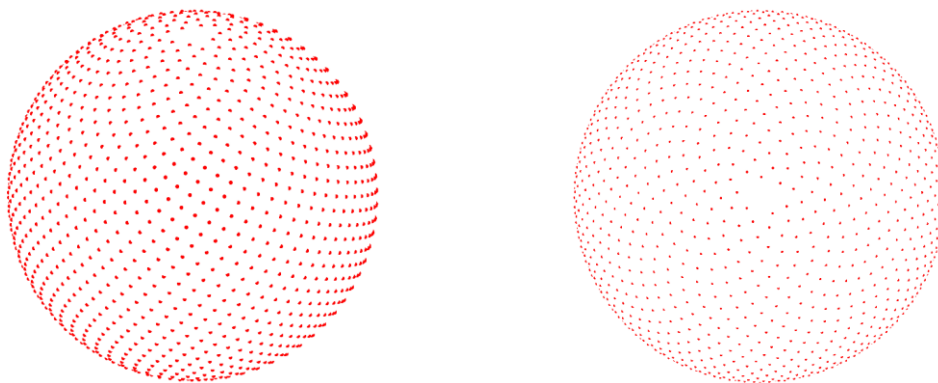
Obrázok 4.7 – Rozmiestnenie lúčov podľa Fibonacciho Zlatej špirály.

Tento druh rozmiestnenia bodov dosahuje lepšie výsledky ako predošlé rozloženia. Najmenšia vzdialenosť dvoch susedných bodov pri rozmiestnení 1800 bodov je rovná $\delta(X_{1800}) = 7,548 \cdot 10^{-2}$

E. Zlatá špirála s pozmenenými konštantami

Podľa článku [11] je možné dosiahnuť Zlatou špirálou lepšie rozloženie pridaním konštanty epsilon do vzorca. Aby rozloženie dosahovalo lepšie výsledky musí byť pre určitý počet bodov zvolená iná konštanta epsilon. Pre 1800 bodov by malo mať epsilon hodnotu $\epsilon = 3$. Súradnice pre n bodov sú dané rovnicami

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{\sqrt{5} + 1}{2}, & \phi^{-1} &= (\phi - 1) \cdot 2\pi, \\ \text{lat}_i &= \sin^{-1} \left(1 - \frac{2(i + \epsilon)}{n - 1 + 2\epsilon} \right), & \text{lon}_i &= \phi^{-1} \cdot i \end{aligned} \quad (4.8)$$



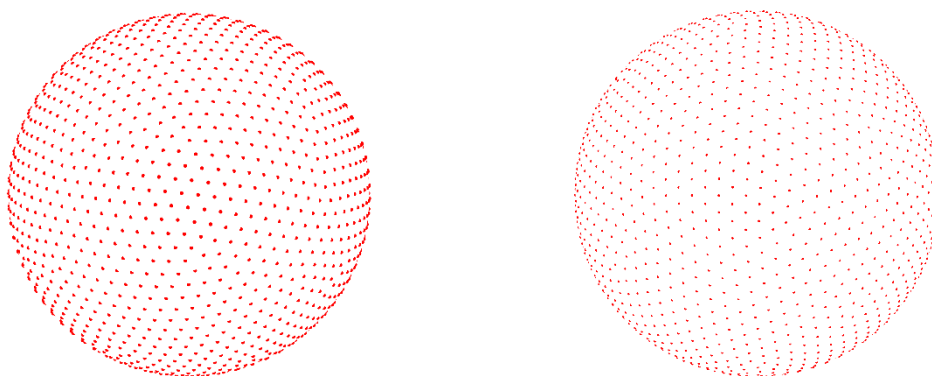
Obrázok 4.8 – Rozloženie lúčov podľa upravenej Fibonacciho Zlatej špirály.

Rozmiestnenie s konštantou epsilon je trochu rovnomernejšie ako rozloženie bez použitia tejto konštanty. Najmenšia vzdialenosť dvoch susedných bodov pri rozmiestnení 1800 bodov je rovná $\delta(X_{1800}) = 7,715 \cdot 10^{-2}$. Dochádza pri ňom však k menšej hustote bodov v okolí pólov. Podľa článku [11] je možné tento problém vyriešiť jednoduchým pridaním dvoch bodov priamo na póly sféry. Pri zvyšovaní parametru epsilon sa body ďalej presúvajú od pólov gule, čo spôsobuje lepšie výsledky na základe maximálnej vzdialenosti susedných bodov, ale priemerná vzdialenosť sa znižuje.

F. Automatické rozloženie odpudzovaním bodov

Posledný spôsob rozloženia bodov bol vytvorený na základe prvotného predpokladu, že najlepšie rozloženie sa dosiahne pri minimálnom energetickom stave elektrónov v pudingovom modeli atómu. [8] Za účelom testovania bol vytvorený skript v programe MATLAB. Na začiatku algoritmu bola najprv vytvorená matica bodov podľa Fibonacciho Zlatej špirály s pozmenenými konštantami. Jednotlivé body boli naprogramované, aby s každou iteráciou algoritmu posunuli svoju pozíciu na základe odpudzovania od ostatných bodov. Sila odpudzovania bola nastavená so závislosťou $1/d^2$, kde d predstavuje vzdialenosť dvoch bodov, aby čo najviac imitovala Coulombov zákon.

Už po pár iteráciách dosahovalo takto vytvorené rozloženie lepšie výsledky. Pre dosiahnutie čo najlepších výsledkov prebehol algoritmus 10^5 -krát. Výsledné rozloženie je znázornené na obrázku 4.9.



Obrázok 4.9 – Rozloženie lúčov pomocou simulácie odpudzovania.

Rozloženie pomocou odpudzovania bodov bolo pri testovaní veľmi závislé od pôvodného rozloženia. Pri tomto druhu rozloženia sa predpokladá, že je najpresnejšie pri počte iterácií $N \rightarrow \infty$. Zdrojový kód rozloženia bodov je dostupný v prílohe na CD.

Po priebehu 10^5 iterácií dosiahlo rozloženie hodnôt $\delta(X_{1800}) = 7,964 \cdot 10^{-2}$, $\overline{\delta(X_N)} = 8,598 \cdot 10^{-2}$

Vyhodnotenie

Tabuľka 4.1 – Výsledky rovnomernosti rozloženia bodov na sfére.

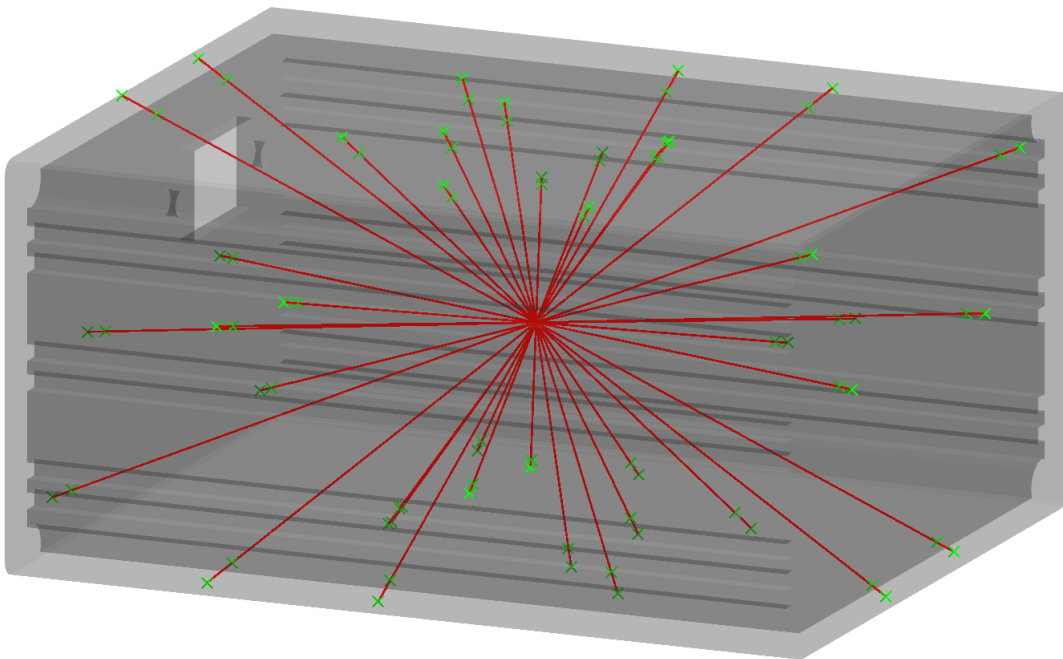
	A	B	C	D	E	F
N	1734	1722	1764	1800	1800	1800
$\delta(X_N) [10^{-2}]$	4,997	1,117	5,927	7,548	7,718	7,964
$\overline{\delta(X_N)} [10^{-2}]$	7,603	6,412	6,338	8,016	8,011	8,598

Najlepšie výsledky dosiahlo rozloženie F – Automatické rozloženie odpudzovaním bodov. Toto rozloženie je však oveľa náročnejšie na implementáciu, pretože rozloženie nie je možné realizovať v reálnom čase. Všetky použiteľné rozloženia musia byť preto vypočítané pred spustením simulácie.

4.3 Prepočet radiácie

Pri Ray trace metóde predstavuje každý lúč jeden sektor s rovnakým priestorovým uhlom. Každý lúč nesie informáciu o dĺžke dráhy vnútro materiálu. Ak lúč prechádza materiálom na niekoľkých miestach, musia byť tieto vzdialenosti sčítané. Ak lúč prechádza materiálmi rôznymi od hliníku, musí byť dráha týmto materiálom prepočítaná na ekvivalentnú dráhu v hliníku. Celková dráha materiálom je následne prepočítaná pomocou DDC na radiáciu. Ray trace metóda predstavuje rovnaký prístup ako metóda SLANT. DDC musí byť preto ekvivalentná modelu plného sférického tienenia. (Tabuľka 2.1)

Grafická ukážka tejto metódy počítania, pri ktorej bolo pre prehľadnosť použitých len 20 priamok, je zobrazená na obrázku 4.10.



Obrázok 4.10 – Grafické znázornenie lúčov a ich priesečníkov s modelom skrinky.

5. REALIZÁCIA ALGORITMU

Pre realizáciu algoritmov z kapitol 3 a 4 bol použitý program MATLABTM. NORM a SLANT sektorová analýza bola navrhnutá formou skriptov s natvrdo nastavenými geometriami a detektormi. Algoritmus z kapitoly 4 bol navrhnutý ako samostatný software s vlastným grafickým užívateľským rozhraním pre pohodlné použitie.

Pre použitie Ray trace softwaru je potrebná inštalácia knižnice MATLAB Runtime. Program bol skompilovaný vo verzii MATLAB R2020b. Systémové požiadavky pre spustenie programu sú uvedené na stránke MATLAB, [12] alebo v prílohe F.

5.1 NORM sektorová analýza

Princíp počítania je popísaný v kapitole 3.

5.1.1 Vstup algoritmu

Vstup algoritmu tvorí matica súradníc bodov, ktoré sa budú analyzovať a príslušná krivka DDC vo formáte CSV. Geometria je na vstupe zadaná pomocou dvoch bodov, ktoré spolu tvoria úsečku rovnú priestorovej uhlopriečke zadaného kvádra. Posledný vstupný údaj je vektor *c_walls* so zadanými hodnotami hrúbok jednotlivých stien skrinky.

V ďalšom bode sa vytvoria matice *rects*, ktoré tvoria štvorice bodov a znázorňujú obdĺžniky jednotlivých stien skrinky.

5.1.2 Jadro

Algoritmus počíta radiáciu samostatne pre každý zadaný bod zo vstupnej matice detektorov. Pre každý bod je vypočítaný priestorový uhol každej steny skrinky a jej hrúbka zo zadanej matice je prepočítaná na radiáciu jednoduchou interpoláciou.

```
for i_sektor = 1:6
    angle = calc_angle(rects(:, :, i_sektor), test_point);
    dose = interp1(ddc(:, 1), ddc(:, 2), c_walls(i_sektor), 'previous');
    Dose_tot = Dose_tot + angle/4/pi()*dose;
end
```

calc_angle predstavuje funkciu, ktorá spočíta priestorový uhol štvoruholníku v priestore voči zadanému detektoru. Pre výpočet sú použité vzťahy {(3.1), (3.2), (3.3)}. Zdrojový kód tejto funkcie je uvedený v prílohe C.

Pre overenie správneho fungovania algoritmu musí platiť, že súčet priestorových uhlov pre jednotlivé steny skrinky je vždy rovný:

$$\sum_{i=1}^6 \Omega_i = 4\pi$$

Dose_tot predstavuje výslednú hodnotu radiácie, ktorá je následne zapísaná do výstupnej matice.

5.1.3 Výstup

Výstup algoritmu predstavuje trojrozmerná matica hodnôt radiácie. Graf rozloženia je následne možné zobrazit' funkciou *pcolor* alebo *surf*. Príklady výstupov tohto algoritmu sú znázornené na obrázkoch 6.6, 6.10 a 6.14.

5.2 SLANT sektorová analýza

Princíp počítania je popísaný v kapitole 3.2.

5.2.1 Vstup algoritmu

Vstup algoritmu sa zhoduje so vstupom NORM sektorovej analýzy. V tomto algoritme sa rozdelí každá stena skrinky na sieť so zadaným rozlíšením. Pre účely tejto analýzy bola každá stena rozdelená na sieť 100x100 obdĺžnikov. Pri rozdelení na menší počet obdĺžnikov dochádza k mriežkovému efektu, pri ktorom sa vytvárajú zóny s menším dopadom radiácie medzi hranicami jednotlivých obdĺžnikov. Tento efekt sa prejavuje najviac v oblasti blízkej stenám skrinky.

5.2.2 Jadro

Postup výpočtu je analogický k NORM sektorovej analýze. Namiesto toho, aby sa pre každú stenu počítal priestorový uhol, počíta sa pre každé oko siete každej steny. Funkcia *calc_angle* bola preto pre túto metódu upravená aby počítala uhly rovno do matice. Hrúbka steny v jednotlivom oku siete je vypočítaná podľa vzťahu (3.4). Funkcia *slant_sektor* berie ako vstupné argumenty maticu obdĺžnikov, normálový vektor na plochu steny, pozíciu detektoru a normálovú hrúbku danej steny. Táto funkcia musí podobne ako pri NORM sektorovej analýze prebehnúť pre každú stenu skrinky. Zdrojový kód funkcie *slant_sektor* je uvedený v prílohe D.

Overenie správnosti je rovnaké ako aj pri NORM analýze. Súčet všetkých priestorových uhlov musí byť rovný 4π .

5.3 Ray trace analýza

Princíp počítania je popísaný v kapitole 4. Táto kapitola pre zjednodušenie vysvetľuje verziu algoritmu vo forme skriptu, bez použitia GUI. V prílohe na CD je prístupný zdrojový kód oboch verzií. Samotný algoritmus počítania bol optimalizovaný pomocou MATLAB modulu Parallel Computing Toolbox™, s ktorým môže byť značná časť výpočtov presunutá na grafickú kartu. Aby mohol byť výpočet urýchlený pomocou grafickej karty je potrebné mať grafickú kartu značky NVIDIA s podporovanou architektúrou. Aktuálne podporované architektúry sú uvedené na stránke MATLAB. [13] Architektúry podporované v čase vytvorenia tejto práce sú uvedené v prílohe E.

5.3.1 Vstup algoritmu

Ray trace analýza sa od ostatných dvoch druhov líši v rozdielnom zadaní geometrie. Vstup geometrie je v tomto prípade jeden alebo viacero ľubovoľných STL súborov v binárnom formáte (ASCII formát nie je podporovaný). Každý zadaný STL súbor musí mať zároveň priradenú hodnotu materiálu. Tá je vyjadrená ako pomer hustoty zvoleného materiálu objektu voči hustote hliníku ($2,7g/cm^3$).

Ďalšími vstupnými parametrami sú rovnako sieť detektorov, DDC a v tomto prípade si musí používateľ zadať aj počet lúčov, ktorý bude pre analýzu použitý.

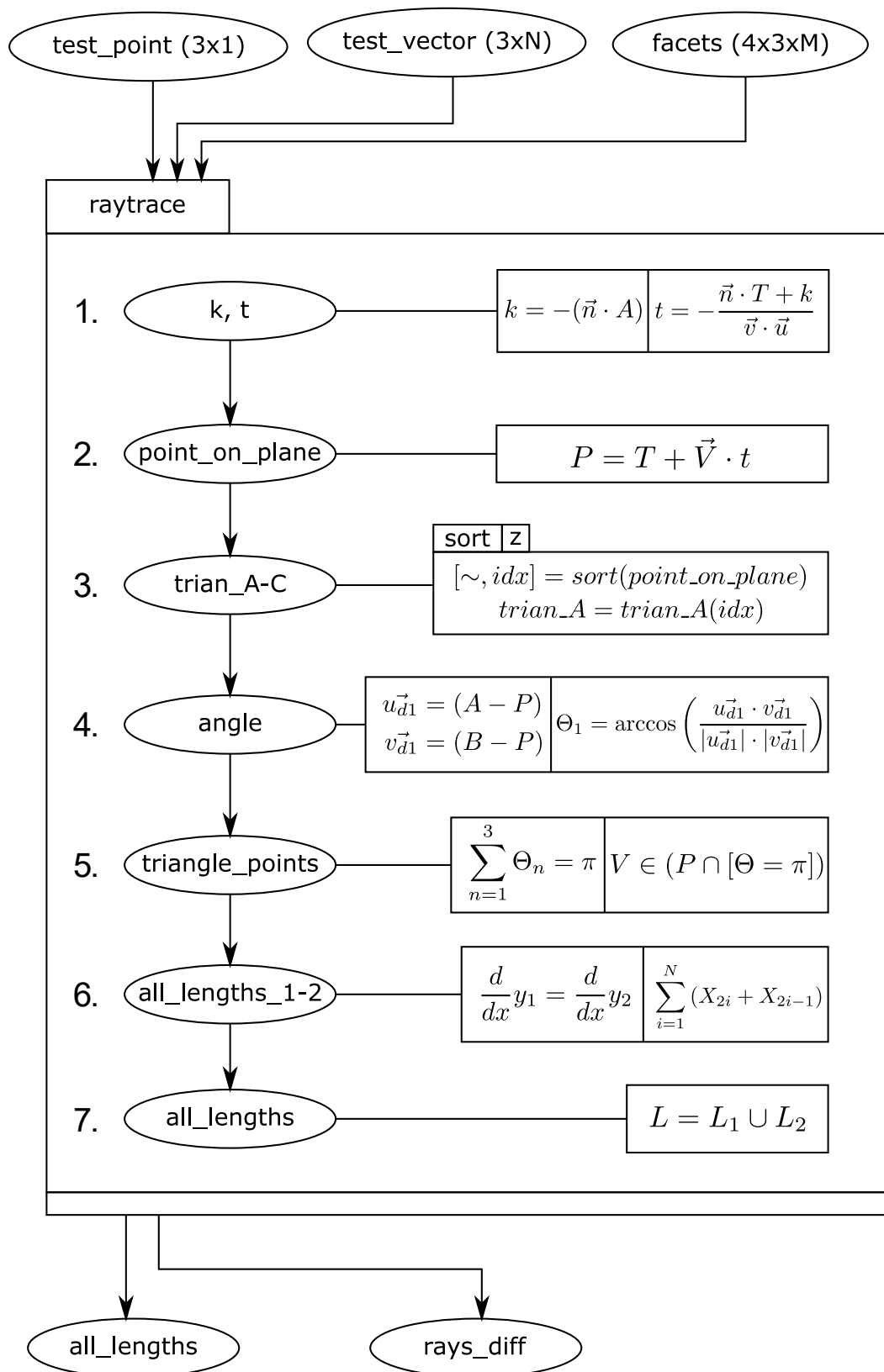
5.3.2 Inicializácia

Na začiatku je potrebné prečítať vstupný súbor, v ktorom sú zapísané všetky vstupné údaje. Vstupné údaje sa nachádzajú v súbore *input.csv*. Súbor obsahuje názvy súborov s uloženými geometriami, názov súboru s DDC, počet lúčov a súradnice plošného alebo bodových detektorov. Príklad takého súboru je priložený spolu s programom. Všetky zadané geometrie sa načítajú do pamäte zo súborov STL umiestnených v rovnakom priečinku. Funkcia *readbinarystl(filename)* zo súboru STL načíta všetky trojuholníky geometrie a zapíše do matice. DDC priložená v súbore CSV má dva stĺpce. Prvý stĺpec obsahuje údaje o hrúbke materiálu v milimetroch a druhý hodnotu radiácie v jednotkách *rad(Si)*. Podľa typu zadania sa vytvorí buď trojrozmerná sieť detektorov so zadanými súradnicami uhlopriečky a rozlíšením, alebo sa len načítajú jednotlivé detektory zadané vo forme zoznamu. Následne sa podľa zadaného počtu lúčov načítajú súradnice jednotlivých vektorov rozložených automatickou distribúciou (kapitola 4.2) funkciou *createtestvector*.

5.3.3 Jadro

Hlavná časť algoritmu predstavuje funkcia *ray_trace*. Táto funkcia spočíta celkovú radiáciu dopadajúcu na detektor. Musí prebehnúť pre každý detektor v sieti zadaných detektorov minimálne raz. Ak dôjde k chybe pri výpočte, funkcia vráti chybovú hodnotu. Chyba môže nastať napríklad pri nájdení nepárneho počtu priesečníkov. V tom prípade sa musí funkcia zopakovať pre rôzne natočené lúče, čím sa dosiahne zmena rozloženia.

Diagram funkcie *ray_trace* je znázornený na obrázku 5.1.



Obrázok 5.1 – Diagram funkcie raytrace.

Funkcia má na vstupe 3 parametre. Jedným je vektor analyzovaného bodu (detektoru), druhý je matica vektorov, ktoré predstavujú jednotlivé testovacie lúče a nakoniec matica trojuholníkov, ktorá predstavuje zadanú geometriu. Trojuholníky geometrie sú popísané rovnakým spôsobom ako je v STL súbore. (Obrázok 4.1)

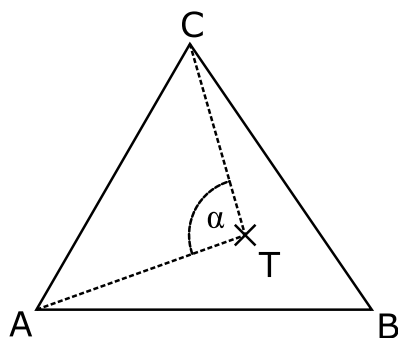
Postup výpočtov vnútri funkcie je nasledovný:

1. Zo zadanej geometrie sa vypočítajú pre všetky trojuholníky koeficienty k , ktoré popisujú rovinu (5.1), na ktorej daný trojuholník leží. Následne je možné vypočítať parameter t , pomocou ktorého je možné vypočítať priesečník trojuholníkovej roviny a priamky popísanej súradnicami detektoru a testovacieho vektora lúču. (5.2)

$$n_x x + n_y y + n_z z + k = 0 \quad (5.1)$$

$$\begin{aligned} x &= x_0 + v_x \cdot t \\ y &= y_0 + v_y \cdot t \\ z &= z_0 + v_z \cdot t \end{aligned} \quad (5.2)$$

2. V ďalšom bode sú vypočítané všetky priesečníky každej priamky s každou rovinou. Vznikne tak matica $N \times M$ bodov.
3. Pretože trojuholníky geometrie nemusia byť nijako logicky usporiadané, je potrebné ich v tomto bode výpočtu usporiadať podľa ich priesečníkov. To znamená, že samotné priesečníky každej priamky sú usporiadané podľa z – súradnice. Aby bolo možné priradiť jednotlivé trojuholníky príslušným priesečníkom, sú všetky trojuholníky usporiadané pomocou indexov usporiadaných priesečníkov.
4. V tomto bode prebieha overenie, či vypočítané priesečníky sú skutočnými priesečníkmi s geometriou. Zistené body sú priesečníkmi práve vtedy, keď sa tieto body nachádzajú vnútri trojuholníku, na ktorého rovine ležia. Pre každý priesečník je spočítaný uhol medzi dvojicami bodov daného trojuholníka. (Obrázok 5.2)



Obrázok 5.2 – Uhol medzi dvoma bodmi trojuholníka.

5. Všetky uhly medzi bodmi trojuholníka sa sčítajú. Pokiaľ je súčet uhlov rovný 2π (360°), priesečník s plochou sa nachádza vnútri daného

trojuholníka. Ak je uhol menší, tak sa bod nachádza mimo trojuholníka. Pre overenie správnosti metódy musí vždy platiť, že počet priesečníkov s geometriou je párny. Pretože pri všetkých matematických operáciách dochádza k takzvanému *floating point* zaokrúhľovaniu, nastáva situácia, kedy sa priesečníkov nachádza menej alebo viac ako je skutočný počet. K chybám dochádza v prípade, že lúč prechádza práve na hranici dvoch trojuholníkov. V tom prípade je súčet uhlov pre oba trojuholníky rovný približne 2π . Vyhodnocovanie rovnosti s hodnotou 2π bolo nastavené s dostatočnou toleranciou, aby sa vyskytli prípady, kedy dva priesečníky ležia na rovnakej pozícii. V ďalšej operácii sú preto takéto duplicitné body odstránené.

6. Matica všetkých priesečníkov sa v ďalšom bode rozdelí na dve množiny. Jedna množina priesečníkov sa nachádza nad detektorom a druhá pod detektorom. Týmto rozdelením dosiahneme, že lúče už nereprezentuje priamka, ale polpriamka začínajúca v súradniciach detektoru. Skutočný počet analyzovaných lúčov je tým pádom dvojnásobný, ako je pôvodný počet.

Jednotlivé množiny bodov nie sú rozdelené podľa jednotlivých lúčov, ku ktorým sú príslušné. Aby sa body týmto spôsobom opäť rozdelili, spočíta sa pre každý bod smernica priamky prechádzajúca priesečníkom a detektorom. Všetky priesečníky, ktoré majú rovnakú smernicu, ležia na tej istej priamke a sú príslušné tomu istému lúču. Pretože sú jednotlivé priesečníky správne zoradené (bod 3), stačí už len za sebou idúce dvojice s rovnakou smernicou od seba odčítať a výsledky sčítať. Aby tento krok prebehol správne, je potrebné, aby sa detektor nachádzal mimo skúmaného objektu. Ak sa detektor nachádza vnútri, alebo došlo k nesprávnemu určeniu priesečníkov, funkcia vracia chybovú hodnotu.

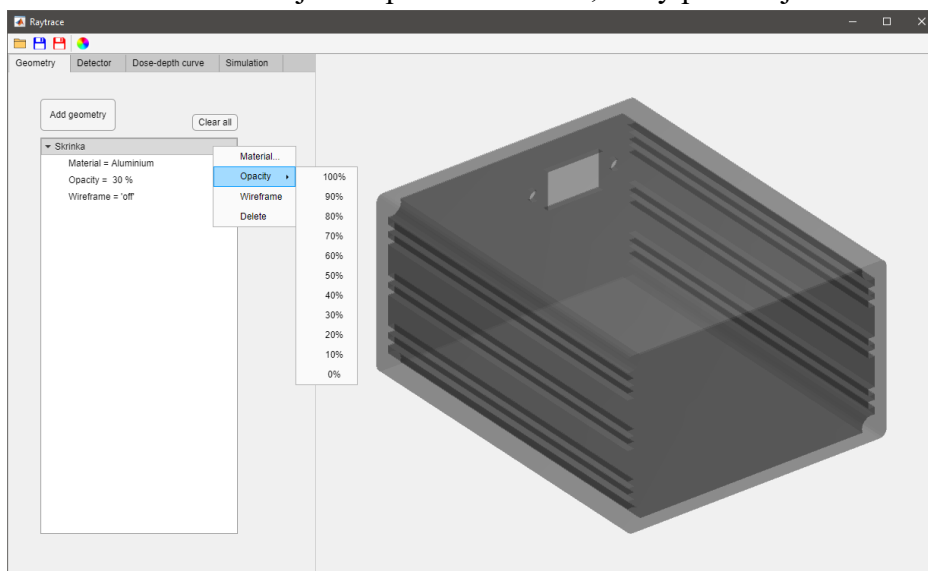
7. Posledný krok algoritmu spojí dokopy matice vzniknutých dráh vnútro materiálu. Výstup funkcie tvorí vektor s hodnotami dráh veľkosti $2N$ a matica $3 \times 2N$ vektorov jednotlivých lúčov v správnom poradí. Matica lúčov je potrebná hlavne pre overenie funkčnosti, ale zároveň aj pre možnosť následného vykreslenia jednotlivých lúčov.

5.3.4 Uživateľské rozhranie

Jedným z cieľov práce bolo vytvorenie softwaru, ktorý bude použiteľný v praxi. K tomu je dôležité vytvoriť uživateľské rozhranie, ktoré bude jednoduché a intuitívne. Pretože bol hlavný algoritmus realizovaný vo forme skriptu v programe MATLAB, uživateľské rozhranie bolo v tomto programe tiež navrhnuté. Na tvorbu uživateľského rozhrania slúži takzvaný App Designer, ktorý umožňuje vytvárať aplikácie podobné WinForms aplikáciám.

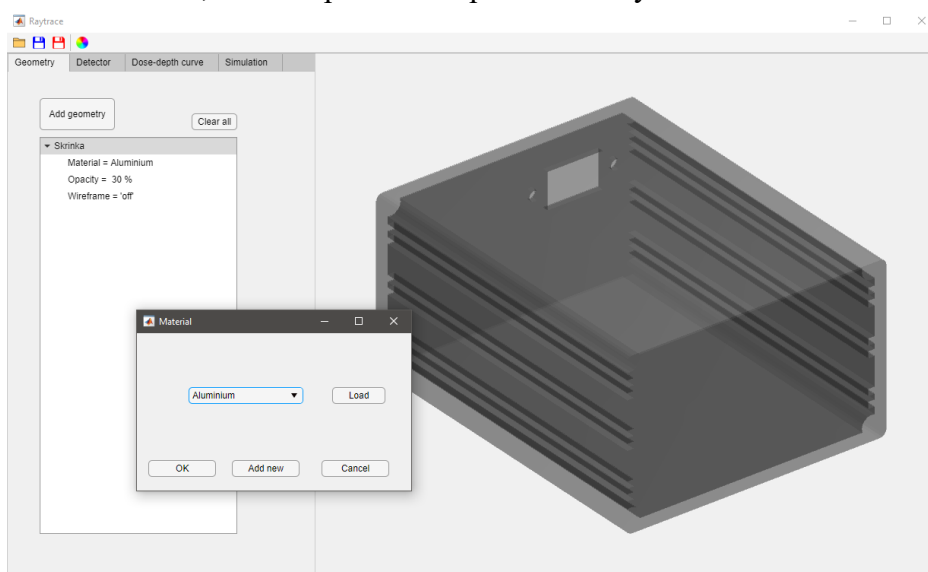
Celá funkčnosť aplikácie bola rozdelená na niekoľko záložiek. Každá záložka predstavuje niektorý krok zadania potrebných informácií pre analýzu. Všetky nastavenia môžu byť priebežne ukladané do jedného súboru s príponou *.prj*.

Prvá záložka slúži na načítanie celej analyzovanej geometrie. Tá musí byť dopredu rozdelená na niekoľko STL objektov podľa materiálu, ktorý používajú.



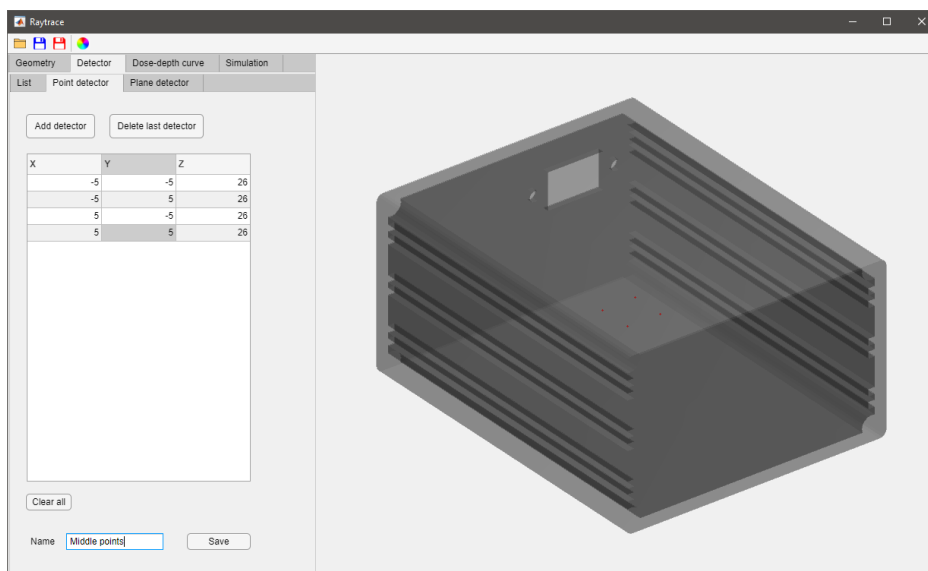
Obrázok 5.3 – Načítanie geometrie a nastavenie zobrazenia

Po načítaní geometrií je potrebné každej priradiť materiál. Ak nedôjde k priradeniu vlastného materiálu, priradí sa základný materiál (hliník). Výber materiálu prebieha po vybratí položky *Material...* z kontextového menu. Následne sa otvorí okno so zoznamom materiálov. Pre načítanie vlastného zoznamu slúži tlačidlo *Load*. Ak sa použitý materiál nenachádza v zozname, môže si používateľ pridať vlastný materiál tlačidlom *Add new*.



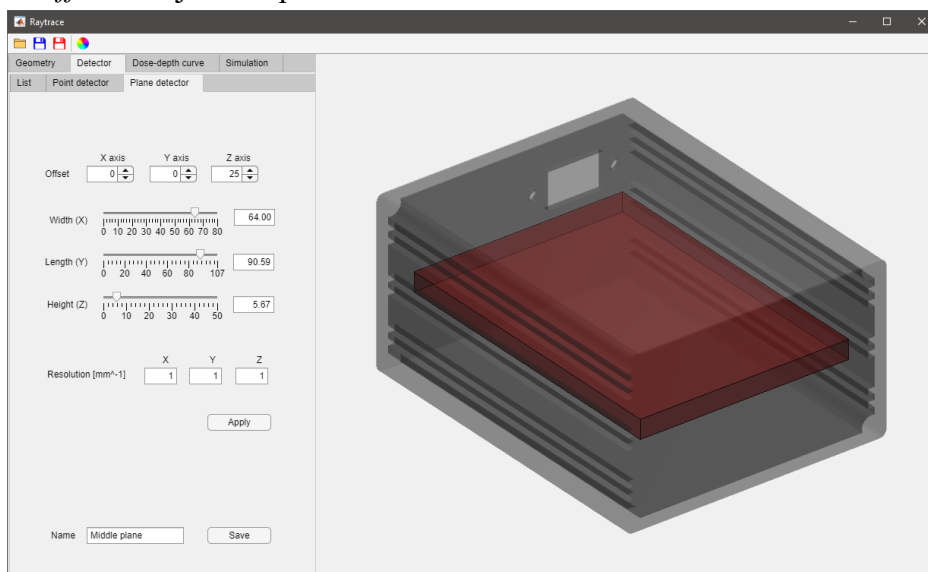
Obrázok 5.4 – Priradenie materiálu konkrétnej časti geometrie

Ďalším dôležitým krokom je zadanie detektorov. To je možné zadaním jednotlivých detektorov do tabuľky v záložke *Detector/Point detector*. Každý zadaný bod v tabuľke sa priebežne vykresľuje ako červený bod v geometrii. Po dokončení zadávania je potrebné skupinu detektorov pomenovať a uložiť do zoznamu aktívnych detektorov tlačidlom *Save*.



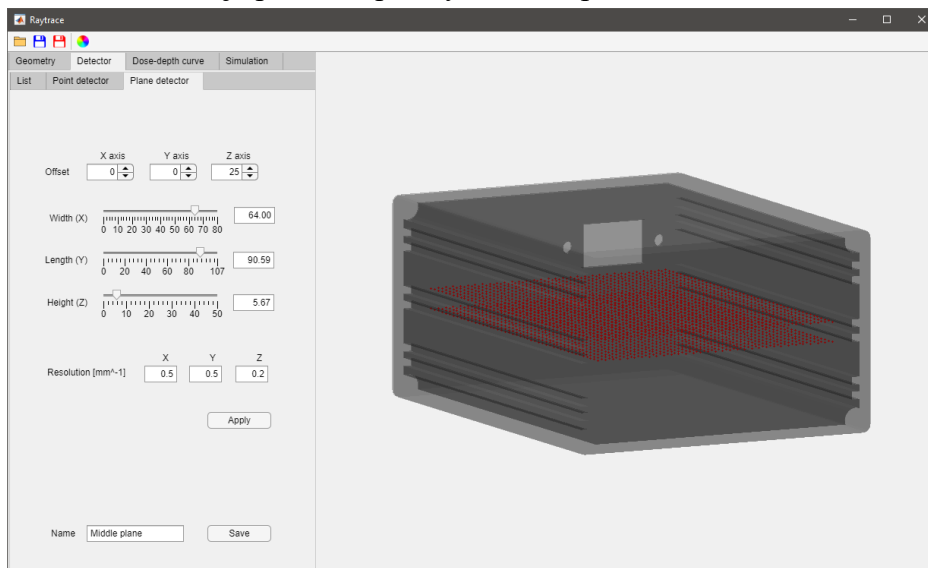
Obrázok 5.5 – Nastavenie jednotlivých detektorov zadávaním do tabuľky.

Druhým spôsobom zadania detektorov je vytvorenie plošného detektoru v záložke *Detector/Plane detector*. V tejto záložke je možné nastaviť rozmery a pozíciu plošného detektoru. Rozmery v troch osiach sú nastaviteľné pomocou *Slideru*, ktorý pri posúvaní vykresľuje plošný detektor v podobe červeného hranolu do geometrie. Hodnota polí s nápisom *offset* určuje stred plošného detektoru.



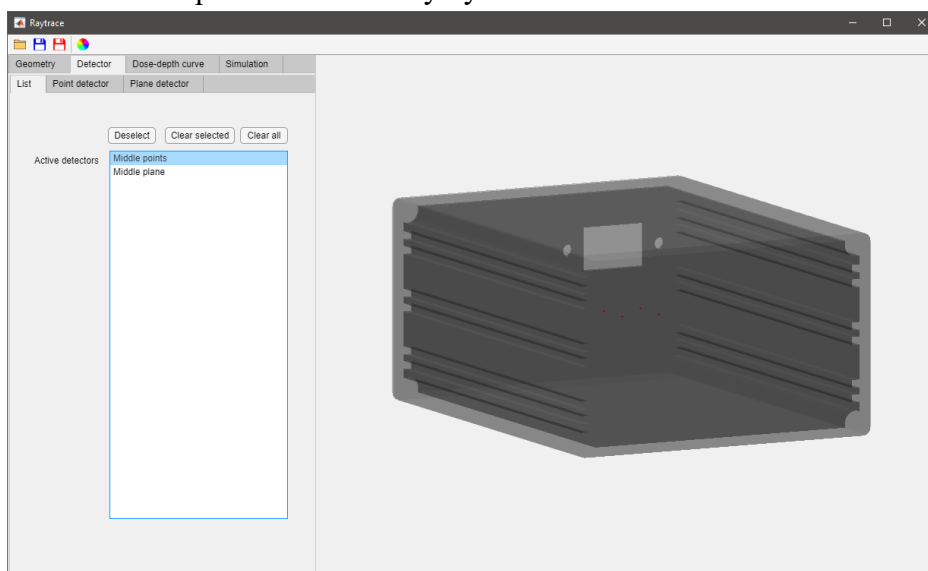
Obrázok 5.6 – Nastavenie plošného detektoru pomocou sliderov

Po nastavení správnych rozmerov detektoru je potrebné nastaviť jeho rozlíšenie. Rozlíšenie určuje počet jednotlivých detektorov na jednotku vzdialenosti plošného detektoru. Stlačením tlačidla *Apply* sa sieť jednotlivých detektorov vykreslí. Po dokončení zadávania je potrebné plošný detektor pomenovať a uložiť tlačidlom *Save*.



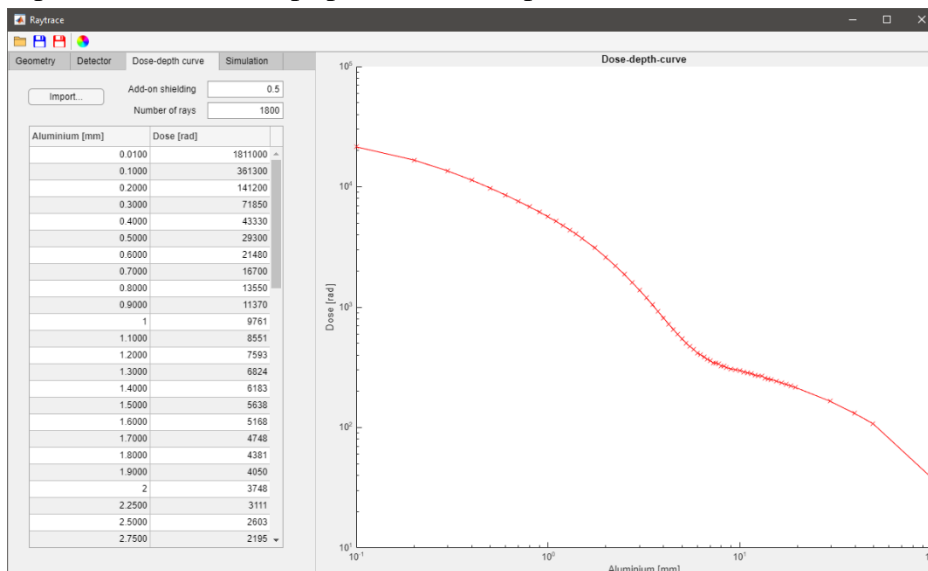
Obrázok 5.7 – Zobrazenie plošných detektorov s nastaveným rozlíšením

Všetky uložené skupiny detektorov je možno vidieť v záložke *Detector/List*. Zoznam znázorňuje všetky aktívne detektory, ktoré budú v simulácii analyzované. Kliknutím na skupinu detektorov sa príslušné detektory vykreslia.



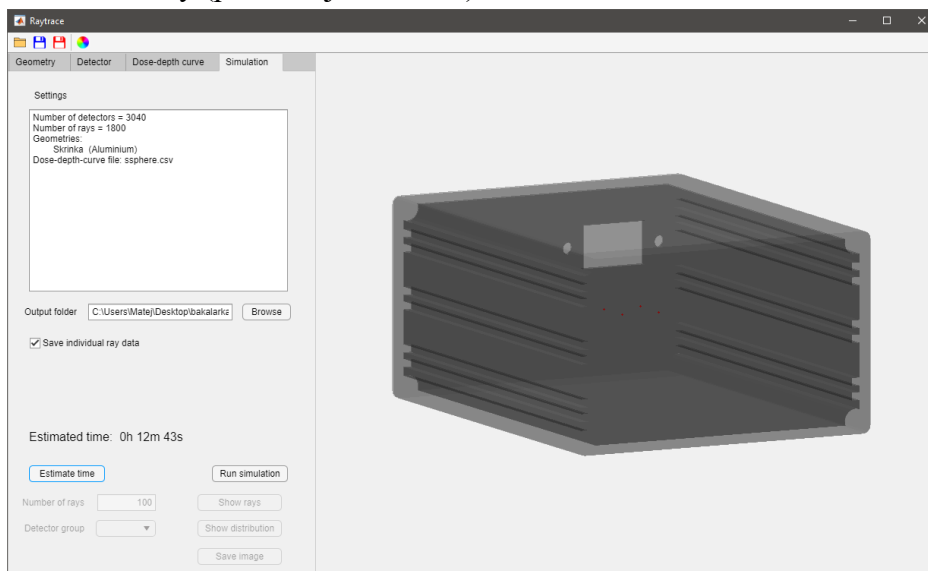
Obrázok 5.8 – Zobrazenie zoznamu aktívnych detektorov

Posledná vec, ktorú je potrebné zadať pred spustením simulácie je DDC. DDC sa načíta zo súboru CSV tlačidlom *Import* v záložke *Dose-depth curve*. DDC sa vykreslí do grafu a jej hodnoty sa vyplnia do tabuľky. V tejto záložke je ešte potrebné nastaviť počet lúčov pre priebeh simulácie a prípadne hodnotu prídavného tienenia.



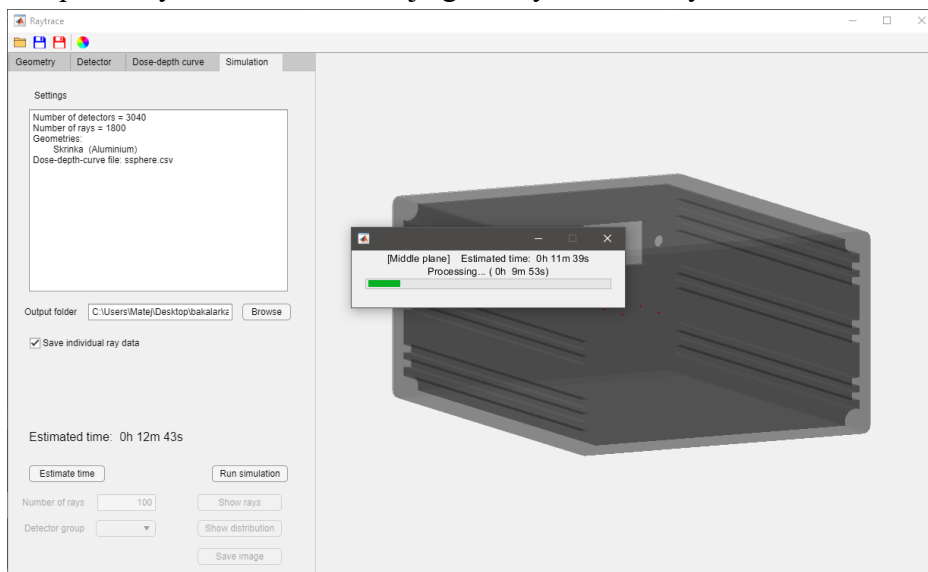
Obrázok 5.9 – Načítanie DDC, nastavenie počtu lúčov a prídavného tienenia

Posledná záložka slúži na kontrolu zadaných parametrov simulácie. Po nastavení výstupného súboru je možné tlačidlom *Estimate time* odhadnúť čas simulácie pre zadaný počet detektorov a lúčov. Okrem toho je čas simulácie ešte závislý od počtu jednotlivých geometrií a ich kvality (počte trojuholníkov).



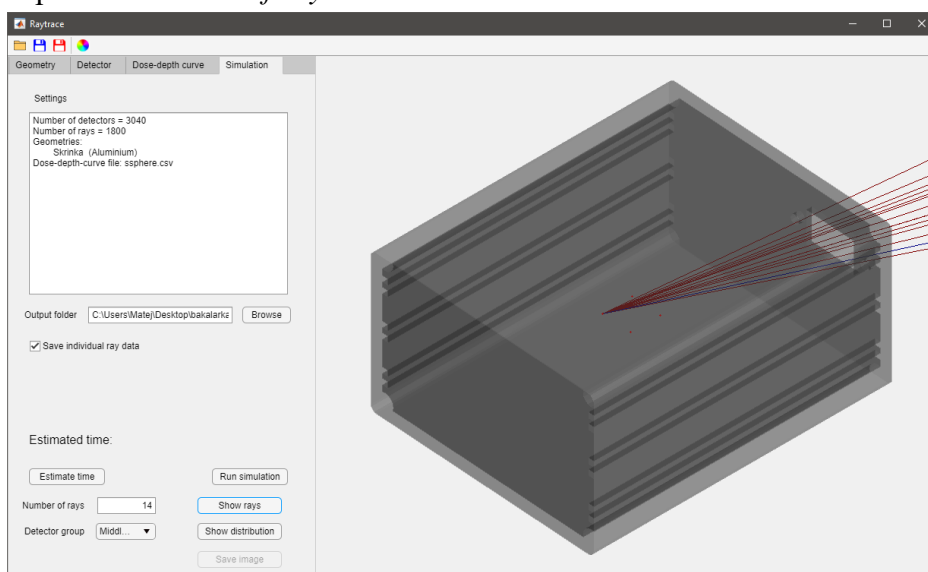
Obrázok 5.10 – Kontrola nastavenia a odhad trvania simulácie

Tlačidlom *Run simulation* sa spustí simulácia pre všetky zadané detektory. Priebeh simulácie a približný čas do ukončenia je graficky znázornený.



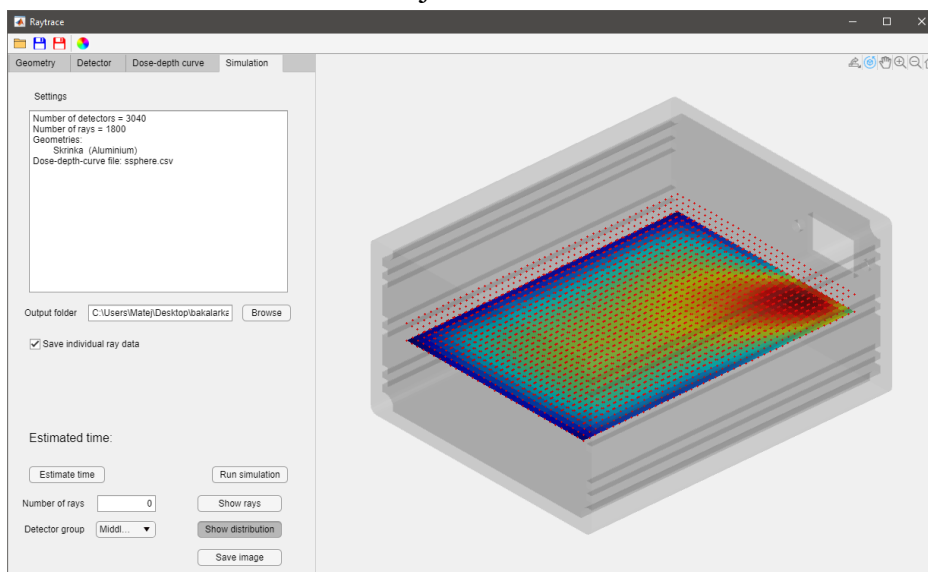
Obrázok 5.11 – Priebeh simulácie

Tlačidlom *Show rays* je možné pre zadané súradnice detektoru znázorniť určitý počet najhorších lúčov analyzovaného detektoru. Počet najhorších lúčov je nastaviteľný hodnotou políčka *Number of rays*.



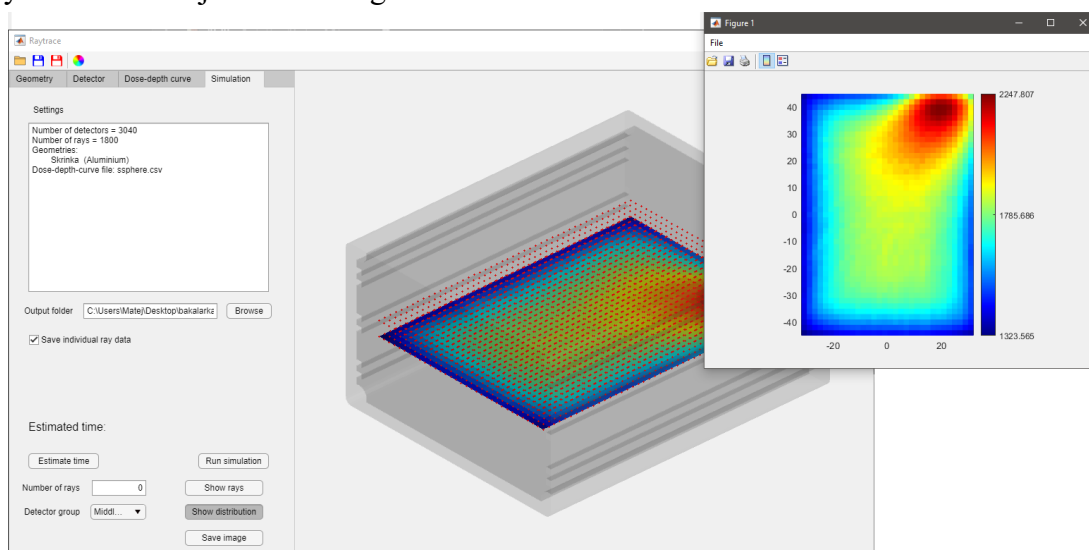
Obrázok 5.12 – Zobrazenie 14 najhorších lúčov pre prvý analyzovaný bod

Po dokončení simulácie je možné zobrazit' rozloženie radiácie na plošnom detektore v ose Z. Možnosť zobrazenia výsledkov je sprístupnená aj po načítaní výsledkov zo súboru tlačidlom *Load results* na hlavnej lište.



Obrázok 5.13 – Zobrazenie plošného rozloženia radiácie

Pre prehľadnejšie zobrazenie je možné tlačidlom *Save Image* plošné zobrazenie vykresliť do dvojrozmerného grafu a uložiť do súboru.



Obrázok 5.14 – Samostatné zobrazenie plošnej radiácie a uloženie obrázku.

6. POROVNANIE METÓD ANALÝZY

V tejto kapitole sú uvedené výsledky analýz pre tri rôzne referenčné geometrie. Referenčné geometrie sú:

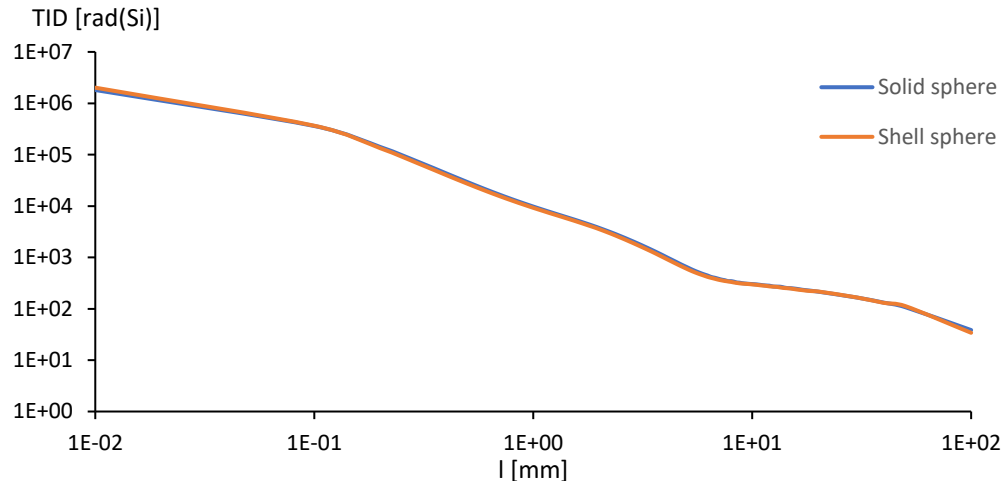
- A. Hliníková kocka s hrúbkami stien 2 mm (Obrázok 6.3)
- B. Hliníkový kváder s rôznymi hrúbkami stien (Obrázok 6.7)
- C. Aproximácia hliníkovej skrinky s plošným spojom (Obrázok 6.11)

Pri každej geometrii bola zadaná sieť analyzovaných bodov, pre ktoré boli vykonané analýzy:

- Jednoduchá sektorová NORM analýza
- Detailná sektorová SLANT analýza
- Ray trace analýza

Pre jednotlivý bod v každej geometrii bola navyše uskutočnená referenčná analýza programom SSAT (*Sector Shielding Analysis Tool*), ktorá je súčasťou systému SPENVIS.

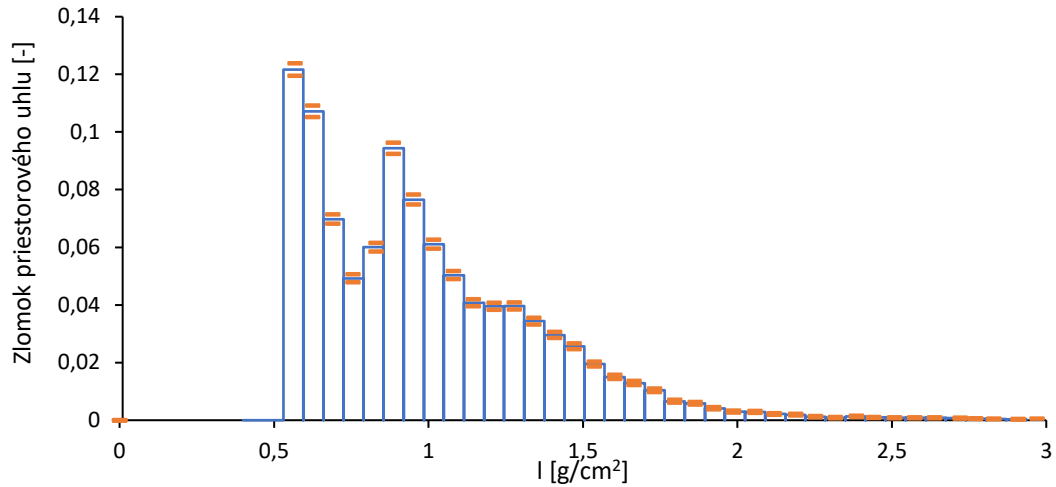
DDC, ktoré boli použité pre jednotlivé analýzy boli získané pomocou softwaru OMERE. Uvedené dáta sú charakteristické pre TID sedem ročnej misie satelitu na obežnej dráhe LEO2. Výsledné DDC sú zobrazené na obrázku 6.1. Hodnoty použitých DDC sú uvedené v prílohe.



Obrázok 6.1 – Dose-depth krivky pre sedem ročnú misiu v LEO2 orbite.

Všetky popísané metódy okrem analýzy programom SSAT pracujú priamo s príslušnou DDC a ich výstupom je hodnota TID dopadajúca na analyzovaný bod. Výstupom programu SSAT je graf popisujúci tienenie geometrie, ktoré musí byť prepočítané na radiáciu.

Výstupný graf programu SSAT pre analýzu referenčnej geometrie C je zobrazený na obrázku 6.2. Vstupné aj výstupné hodnoty programu SSAT sú uvedené v prílohe.



Obrázok 6.2 – Graf rozloženia tienenia referenčnej geometrie C z programu SSAT.

Tienenie je v tomto programe rozdelené na niekoľko intervalov hrúbky materiálu. Každému intervalu je následne pridelený priestorový uhol. Oranžovou farbou je znázornená priemerná hodnota hrúbky tienenia a chyba výpočtu priestorového uhlu pre každý interval. Hodnota radiácie je daná súčtom dielčích radiácií odčítaných z DDC na základe priemernej hrúbky tienenia každého intervalu. Výsledná TID je potom daná vzťahmi:

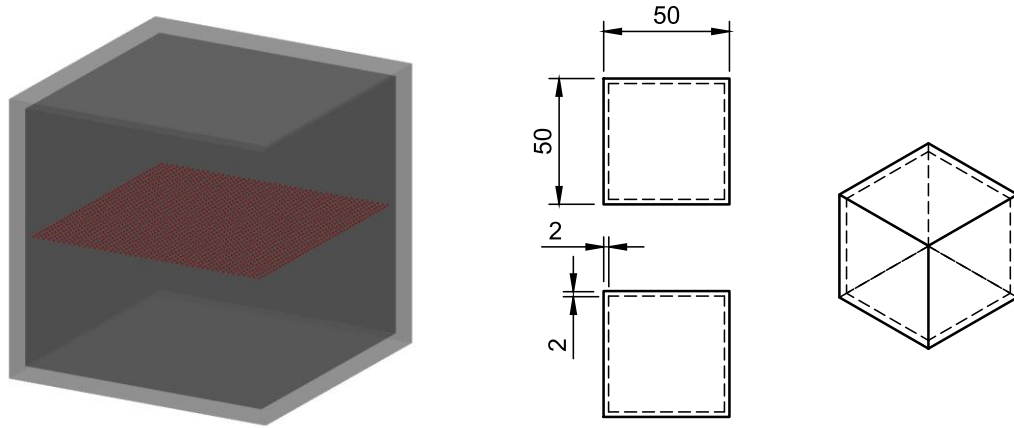
$$TID = \sum_{i=1}^N D(t_i) \cdot (\Omega_i \pm \delta_i), \quad (6.1)$$

$$t_i = 10 \cdot \bar{l}_i \cdot \frac{1}{\rho},$$

kde $D(t_i)$ predstavuje DDC, t_i predstavuje priemernú hodnotu tienenia jedného intervalu v milimetroch, Ω_i predstavuje priestorový uhol a δ predstavuje chybu priestorového uhlu.

6.1 Referenčná geometria A

Referenčná geometria A má tvar kocky s dĺžkami hrán $a = 50 \text{ mm}$ a hrúbkami stien $d = 2 \text{ mm}$. Analyzované detektory tvoria sieť 45x45 bodov vnútri kocky. Detektory sú znázornené červenými bodmi na obrázku 6.3.



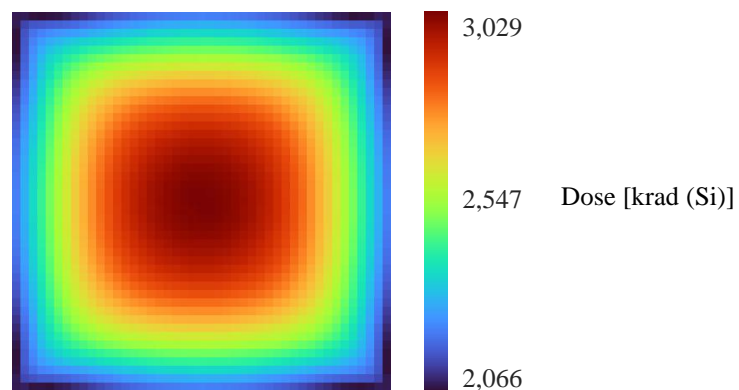
Obrázok 6.3 – 3D zobrazenie referenčnej geometrie A.

Referenčná hodnota TID bola programom SSAT vypočítaná pre analyzovaný bod $[0,0,0]$, ktorý sa nachádza presne v strede kocky.

$$TID_{[0,0,0]} = (3,038 \pm 0,049) \text{ krad}(\text{Si})$$

Na obrázkoch (6.4 - 6.6) sú zobrazené plošné rozloženia TID získané popisovanými analýzami pre zadanú sieť detektorov.

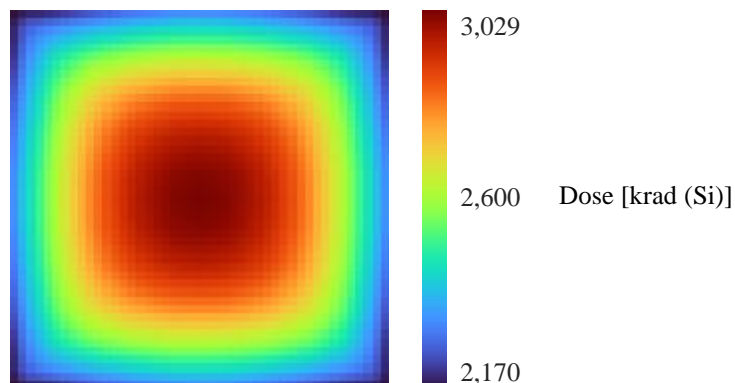
Ray trace analýza



Obrázok 6.4 – Ray trace analýza referenčnej geometrie A.

Výsledná hodnota ray trace analýzy sa pohybuje od hodnoty $TID = 2,066 \text{ krad}(\text{Si})$ na kraji kocky až po hodnotu $TID = 3,029 \text{ krad}(\text{Si})$ v bode $[0,0,0]$. Hodnota TID v bode $[0,0,0]$ má relatívnu odchýlku od referenčnej hodnoty $\delta_r = -0,3\%$.

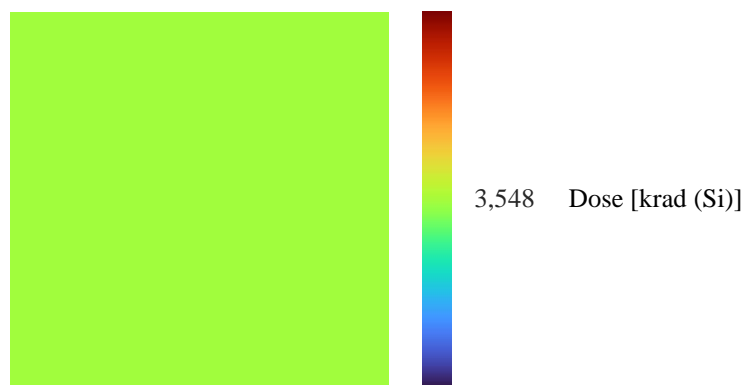
SLANT sektorová analýza



Obrázok 6.5 – SLANT sektorová analýza referenčnej geometrie A.

SLANT sektorová analýza dosiahla väčšie hodnoty radiácie na krajoch skrinky oproti ray trace analýze. TID sa v tomto prípade pohybovala od hodnoty $TID = 2,170 \text{ krad(Si)}$ do $TID = 3,029 \text{ krad(Si)}$. Hodnota v bode $[0,0,0]$ sa zhoduje s hodnotou získanou ray trace analýzou. Relatívna odchýlka od referenčnej hodnoty je rovná $\delta_r = -0,3\%$.

NORM sektorová analýza

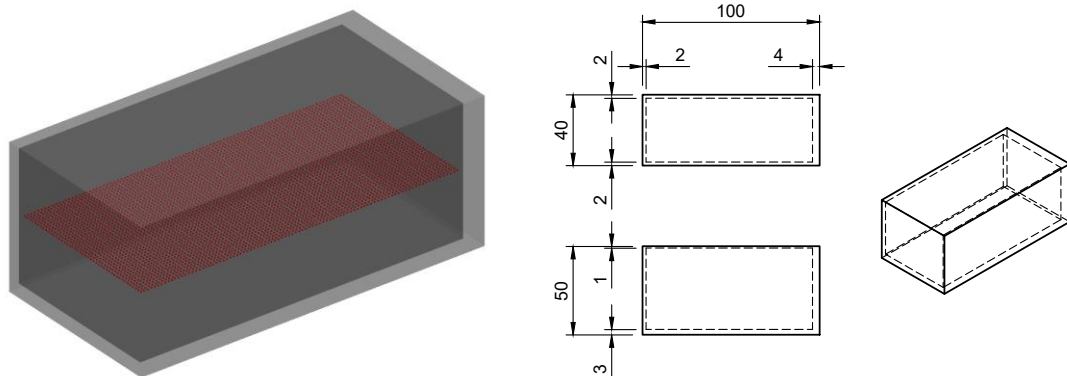


Obrázok 6.6 – NORM sektorová analýza referenčnej geometrie A.

Pri NORM sektorovej analýze takejto geometrie nezáleží na umiestnení bodu, pretože vždy bude súčet podielov radiácií ekvivalentný tieneniu $l = 2 \text{ mm}$. Výsledná TID v každom bode siete je rovná $TID = 3,548 \text{ krad(Si)}$. Táto hodnota je väčšia ako najväčšia hodnota dosiahnutá inou analýzou. Môže byť preto považovaná za konzervatívnu. Relatívna odchýlka od referenčnej hodnoty je rovná $\delta_r = +16,8\%$.

6.2 Referenčná geometria B

Referenčná geometria B má tvar hranolu s dĺžkami hrán $a = 50 \text{ mm}$, $b = 40 \text{ mm}$, $c = 100 \text{ mm}$ a hrúbkami stien $d \in \{1, 2, 3, 4\} \text{ mm}$. Analyzované detektory tvoria sieť 93×45 bodov vnútri kocky. Detektory sú znázornené červenými bodmi na obrázku 6.7.



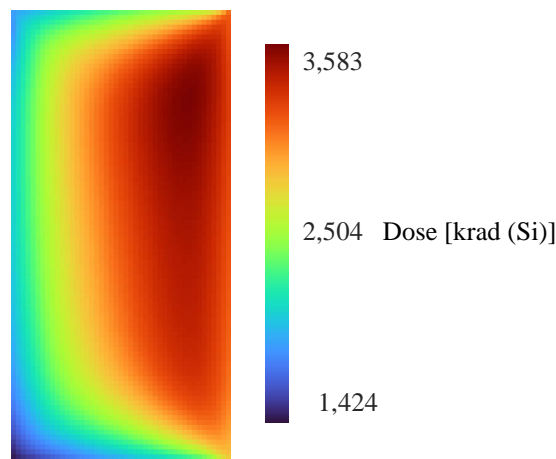
Obrázok 6.7 – 3D zobrazenie referenčnej geometrie B.

Referenčná hodnota TID bola programom SSAT vypočítaná pre analyzovaný bod $[0,0,0]$, ktorý sa nachádza v strede zadaného hranolu.

$$TID_{[0,0,0]} = (2,992 \pm 0,082) \text{ krad}(\text{Si})$$

Na obrázkoch (6.8 - 6.10) sú zobrazené plošné rozloženia TID získané rôznymi analýzami pre zadanú sieť detektorov.

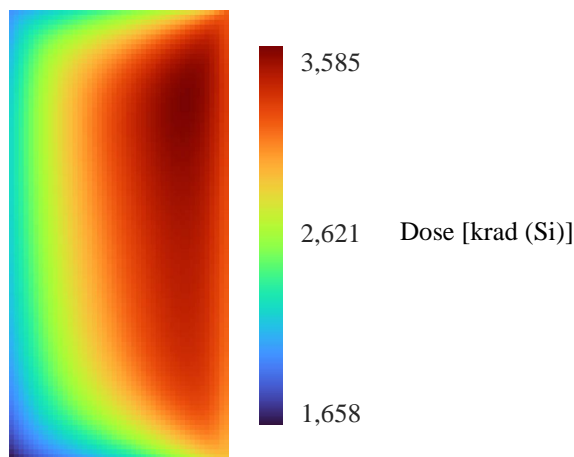
Ray trace analýza



Obrázok 6.8 – Ray trace analýza referenčnej geometrie B.

Ray trace analýza pri referenčnej geometrii C dosiahla najväčšiu hodnotu TID približne v rohu kváдру, blízko tenkých stien. Najmenšia hodnota TID bola naopak v opačnom rohu pri najhrubších stenách. Hodnota TID v bode $[0,0,0]$ je rovná $TID_{[0,0,0]} = 3,129 \text{ krad}(\text{Si})$. Relatívna odchýlka od referenčnej hodnoty dosahuje $\delta = +4,58 \%$.

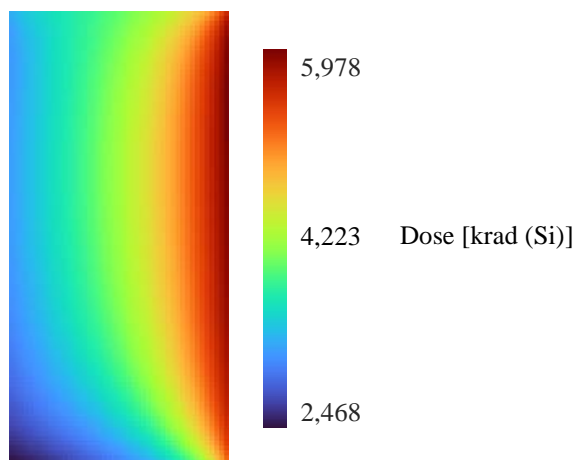
SLANT sektorová analýza



Obrázok 6.9 – SLANT sektorová analýza referenčnej geometrie B.

SLANT sektorová analýza predstavuje pri referenčnej geometrii C skoro totožné rozloženie radiácie. Minimálna dosiahnutá hodnota žiarenia je opäť väčšia ako pri ray trace analýze. Hodnota TID v bode $[0,0,0]$ je rovná $TID_{[0,0,0]} = 3,168 \text{ krad(Si)}$. Relatívna odchýlka od referenčnej hodnoty dosahuje $\delta = +5,88 \%$.

NORM sektorová analýza

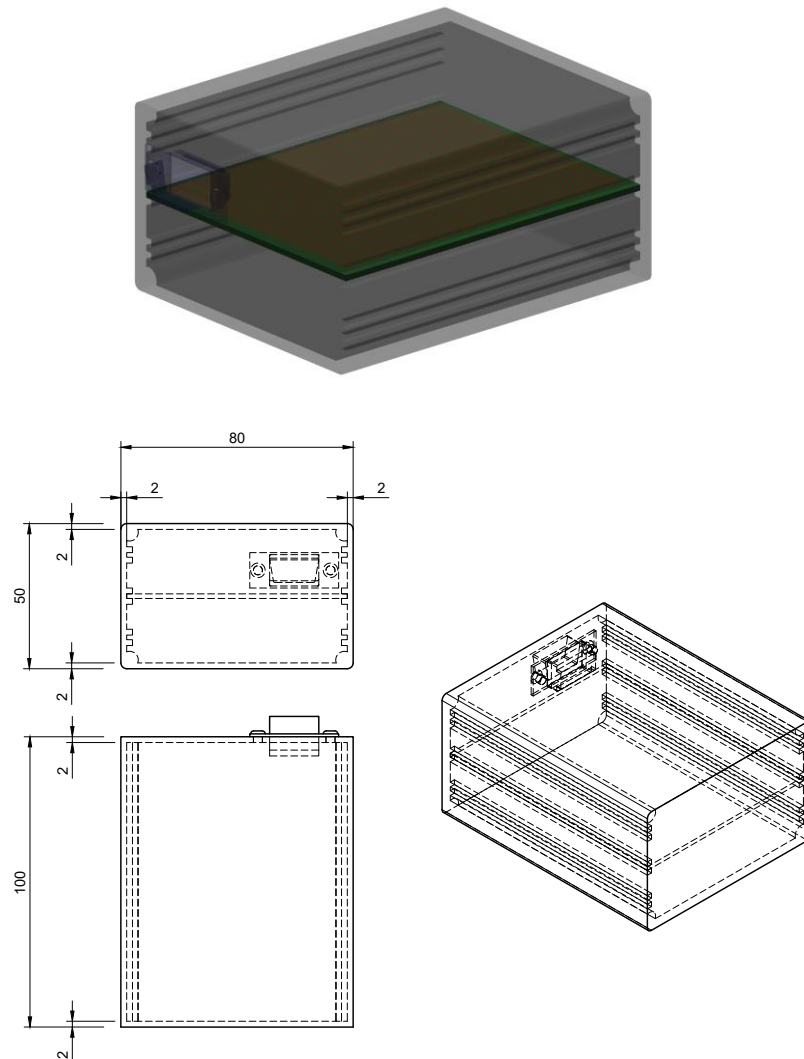


Obrázok 6.10 – NORM sektorová analýza referenčnej geometrie B.

Pri NORM sektorovej analýze sa tento krát mení množstvo v závislosti od polohy analyzovaného bodu. Čím bližšie je analyzovaný bod k tenšej stene, tým viac radiácie naň dopadá. Hodnota TID v bode $[0,0,0]$ je rovná $TID_{[0,0,0]} = 4,142 \text{ krad(Si)}$. Relatívna odchýlka od referenčnej hodnoty dosahuje $\delta = +38,4 \%$.

6.3 Referenčná geometria C

Referenčná geometria C má tvar skrinky pre plošné spoje s dĺžkami hrán $a = 100 \text{ mm}$, $b = 50 \text{ mm}$, $c = 80 \text{ mm}$ a hrúbkami stien $d = 2 \text{ mm}$. Vnútri skrinky sa nachádza doska plošných spojov hrubá $1,6 \text{ mm}$. Skrinka ešte obsahuje drážky slúžiace na udržanie dosky, zhrubné okraje pre uzatváracie skrutky a konektor typu D-SUB na jednej strane. Analyzované detektory tvoria sieť 71×91 bodov umiestnených tesne nad doskou plošných spojov. Detektory sú znázornené červenými bodmi na obrázku 6.11.



Obrázok 6.11 – 3D zobrazenie referenčnej geometrie C.

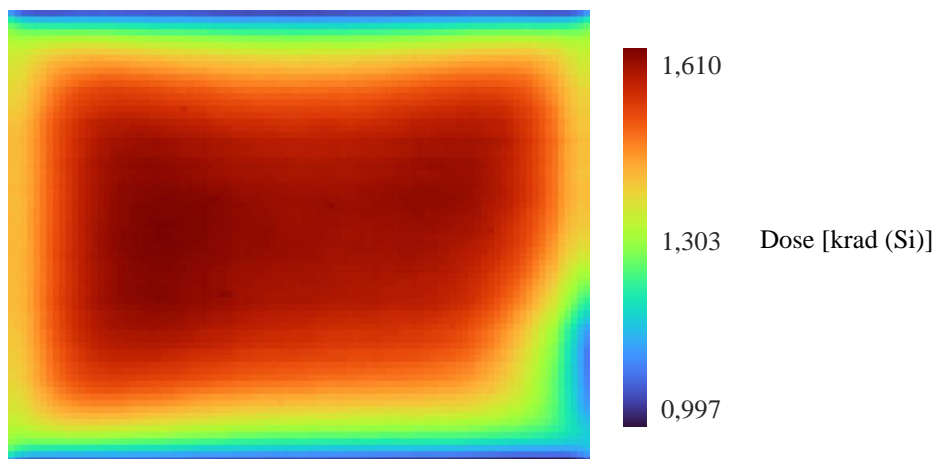
Pre simuláciu v programe SSAT bola nahradená geometria hliníkovou skrinkou so stenami hrúbky 2 mm a doska plošného spoja bola nahradená hliníkovým plátom hrúbky $1,096 \text{ mm}$. Analyzovaný bod bol umiestnený tesne nad doskou plošných spojov. Presné údaje o použitej geometrii sú popísané v prílohe. Výstup SSAT analýzy je pre túto geometriu tiež uvedený v prílohe.

Referenčná hodnota TID bola programom SSAT vypočítaná pre analyzovaný bod $[0,0,2]$, ktorý sa nachádza v strede skrinky, tesne nad doskou plošných spojov.

$$TID_{[0,0,2]} = (1,786 \pm 0,042) \text{ krad(Si)}$$

Na obrázkoch (6.12 - 6.14) sú zobrazené plošné rozloženia TID získané rôznymi analýzami pre zadanú sieť detektorov.

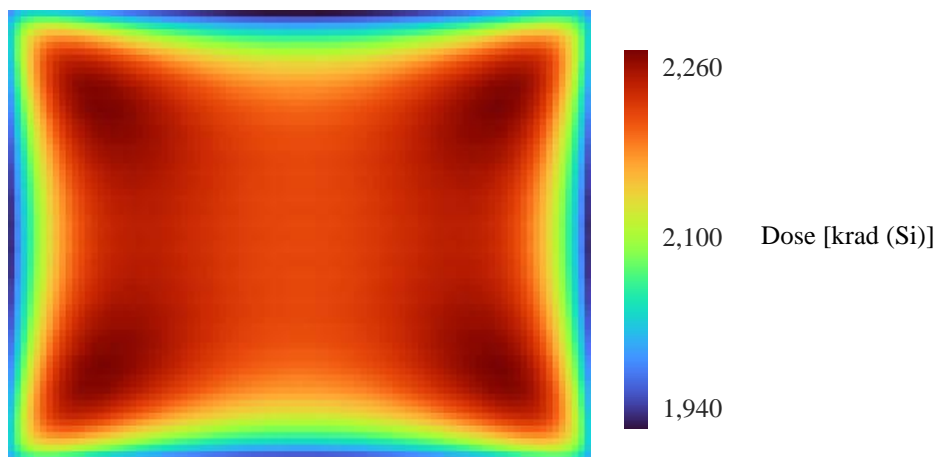
Ray trace analýza



Obrázok 6.12 – Ray trace analýza referenčnej geometrie B

Ray trace analýza ako jediná pracovala s presne zadanou geometriou. Hustota materiálu dosky plošného spoja bola odhadnutá na $\rho = 0,765\rho_{Al}$ a hustota konektoru D-SUB na $\rho = 0,5\rho_{Al}$. Najväčšiu hodnotu TID dosiahla v strede skrinky, bližšie ku strane bez konektoru D-SUB. Hodnota TID v bode $[0,0,2]$ je rovná $TID_{[0,0,2]} = 1,587 \text{ krad(Si)}$. Táto hodnota je menšia ako referenčná hodnota. Tento efekt môže byť spôsobený pôsobením detailov geometrie, ktoré neboli v aproximácii pre program SSAT zahrnuté. Odchýlka od referenčnej hodnoty je rovná $\delta = -11,1 \%$

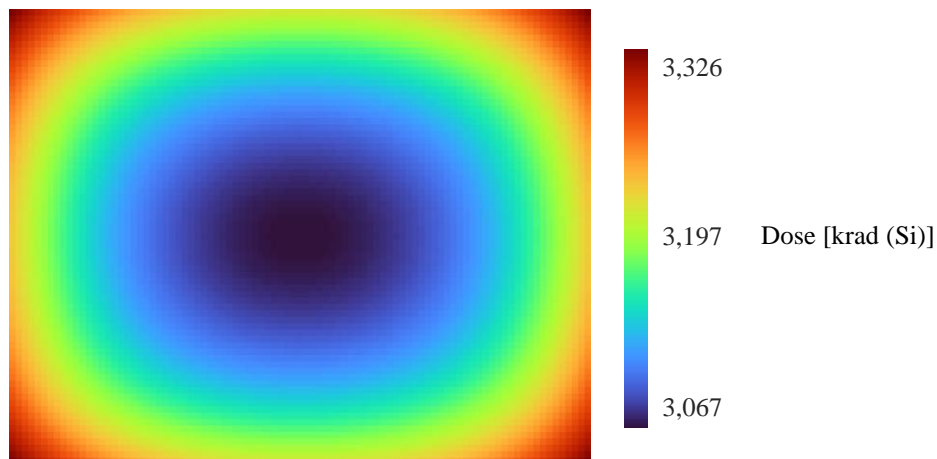
SLANT sektorová analýza



Obrázok 6.13 – SLANT sektorová analýza referenčnej geometrie C.

Pre SLANT a NORM sektorovú analýzu bolo tienenie dosky plošných spojov pripočítané k tieneniu spodnej strany skrinky. Pri týchto analýzach dosahuje preto radiácia výrazne väčšie hodnoty. Hodnota TID v bode $[0,0,2]$ je rovná $TID_{[0,0,2]} = 2,206 \text{ krad}(\text{Si})$. Relatívna odchýlka od referenčnej hodnoty dosahuje $\delta = +23,5 \%$.

NORM sektorová analýza



Obrázok 6.14 – NORM sektorová analýza referenčnej geometrie C.

Pri NORM sektorovej analýze dosahujú najmenšiu hodnotu TID body umiestnené v strede skrinky. Čím bližšie sú body ku stredu, tým väčší priestorový uhol zaberá spodná hrana skrinky, kde je najviac tienenia. Hodnota TID v bode $[0,0,2]$ je rovná $TID_{[0,0,2]} = 3,067 \text{ krad}(\text{Si})$. Relatívna odchýlka od referenčnej hodnoty dosahuje $\delta = +71,7 \%$.

6.4 Vyhodnotenie výsledkov

Na základe výsledkov referenčných analýz boli vyhodnotené jednotlivé metódy počítania radiácie. Jednoduchá sektorová metóda je najjednoduchšia metóda na implementáciu a jej výsledok je možný dosiahnuť aj jednoduchým ručným výpočtom. V prípade správne zadaných okrajových podmienok dosahuje vždy konzervatívnejšie výsledky ako ostatné vyššie spomínané metódy. V prípade, kedy nie je požadovaná vysoká presnosť výpočtu, alebo sa očakáva, že úroveň radiácie nedosiahne kritických hodnôt, môže byť táto metóda pre daný projekt vhodná.

V prípade, že je zadaná geometria v tvare prázdneho kvádra, je taktiež možné použiť SLANT detailnú sektorovú analýzu, ktorá v tomto prípade prináša rovnaké výsledky ako Ray trace analýza. Je oproti nej ale výrazne rýchlejšia a menej náchylná na chyby.

Pre referenciu k všetkým druhom analýz bol použitý software SSAT. Európska vesmírna agentúra ESA uznáva výsledky získané simuláciou radiácie v tomto programe. [2]

V tabuľke 6.1 sú porovnané výsledky TID analýzy pre referenčné geometrie A, B a C. Kladné hodnoty odchýlky reprezentujú konzervatívnejšie výsledky. Geometria A a B mala rovnaký tvar pri všetkých metódach počítania. Metódy Ray trace a SLANT sektorová analýza sa javia ako perspektívne metódy. Ich relatívne odchýlky pri geometrii A sú v rozmedzí chyby referenčnej hodnoty a pri geometrii B presahuje úroveň radiácie iba o pár percent hornú hranicu referenčnej hodnoty. Výsledky geometrie C sú považované za akceptovateľné, pretože pri všetkých metódach okrem Ray trace metódy bola použitá zjednodušená aproximácia modelu skrinky. Metóda Ray trace je preto v tomto prípade považovaná za najpresnejšiu.

Tabuľka 6.1 – Výsledky rôznych metód analýzy

	SSAT	Ray trace		SLANT		NORM	
	TID	TID	δ_r	TID	δ_r	TID	δ_r
	[krad(Si)]	[krad(Si)]	[%]	[krad(Si)]	[%]	[krad(Si)]	[%]
A	$3,038 \pm 0,049$	3,029	-0,30	3,029	-0,30	3,548	+16,79
B	$2,992 \pm 0,082$	3,129	+4,58	3,168	+5,88	4,142	+38,44
C	$1,786 \pm 0,042$	1,587	-11,14	2,206	+23,52	3,067	+71,72

Medzi dôležité faktory ovplyvňujúce výber vhodnej metódy pre počítanie úrovne radiácie patrí:

- požadovaná presnosť výpočtu,
- zložitosť geometrie,
- dostupný výpočtový výkon,

prípadne ďalšie požiadavky stanovené špecifikáciou projektu. Ako najflexibilnejšia metóda bola vyhodnotená metóda Ray trace. Oproti ostatným metódam môže byť jej presnosť zvyšovaná na úkor výpočtovej náročnosti. Môže zároveň pracovať s rôzne zložitými geometriami a dosahuje z týchto metód najpresnejšie výsledky.

ZÁVER

Radiačná analýza je dôležitý krok pri návrhu elektronických obvodov pre špecializované účely, hlavne pri vesmírnych aplikáciách. V tejto práci boli popísané tri metódy pre počítanie ionizujúcej a neionizujúcej radiácie vnútri tieniacej skrinky. Z normy agentúry ESA boli prevzaté tri metódy počítania: metóda jednoduchej a detailnej sektorovej analýzy a Ray trace metóda. V rámci tejto práce boli navrhnuté spôsoby implementácie týchto metód pre účely počítania radiácie vnútri modelu tieniacej skrinky.

Pre metódu Ray trace bolo oproti odporúčaniu normy navyše navrhnuté vylepšenie v podobe rovnomernejšieho rozloženia vysielaných lúčov. S pomocou simulácie odpudzovania častíc boli dosiahnuté najlepšie hodnoty rozloženia zo všetkých testovaných spôsobov.

Všetky tri metódy počítania boli prevedené do výpočtových skriptov v prostredí MATLAB. Na základe princípu Ray trace metódy bolo možné tento algoritmus uplatniť pre počítanie tienenia zložitých geometrií vo forme trojuholníkových sietí. V určitých okrajových podmienkach, vyplývajúcich z princípu metódy popísanej v kapitole 5.3.3, dochádza k nesprávne vyhodnoteným hodnotám tienenia. Táto práca sa nezaoberala numerickými chybami spôsobenými týmto javom, pretože dosahujú nepresnosti rádovo v jednotkách promile. V budúcnosti môže byť metóda vylepšená odstránením všetkých hraničných prípadov, pri ktorých výpočet radiácie neprebehne správne.

Pri porovnaní analýz pomocou referenčných geometrií boli pozorované charakteristické výhody a nevýhody jednotlivých metód počítania. Výsledky boli zároveň porovnávané s referenciou výpočtového programu SSAT, ktorý je tiež založený na metóde Ray trace. Pri testovaní jednoduchých geometrií sa výsledky Ray trace aj SLANT sektorovej analýzy nachádzali tesne nad rozsahom výsledku z programu SSAT. Podrobnejšie sú metódy zhrnuté v kapitole 6.4.

Hlavný výstup tejto práce je samostatný program založený na metóde Ray trace pre počítanie radiácie vnútri tieniacej geometrie. Vďaka rovnomernejšiemu rozloženým lúčom dokáže lepšie napodobniť prienik radiačných častíc do vnútra geometrie, čím zaručí presnejšie výsledky. Prednosťou programu okrem presných výsledkov je aj intuitívne užívateľské rozhranie. Oproti softwaru SSAT navyše pracuje s formátom *STL*, ktorý je bežne používaný a exportovateľný z mnohých dostupných 3D modelovacích programov. Program zároveň dokáže názorne vizualizovať získané výsledky a to buď vo forme zobrazenia najslabších miest v tienení geometrie (obrázok 5.12) alebo plošného rozloženia radiácie pre zistenie najvhodnejšieho umiestnenia citlivej súčiastky (obrázok 5.13). Možnosť počítania plošného rozloženia bola jednou z požadovaných vylepšení oproti komerčným programom.

LITERATÚRA

- [1] ECSS SECRETARIAT. *ECSS-E-ST-10-12C: Methods for the calculation of radiation received and its effects, and a policy for design margins*. First issue. Noordwijk, The Netherlands: ESA, 2008. Dostupné z: <https://ecss.nl/standards/active-standards/>
- [2] ECSS SECRETARIAT, ESA-ESTEC, REQUIREMENTS & STANDARDS DIVISION. *ECSS-E-HB-10-12A: Calculation of radiation and its effects and margin policy handbook*. First issue. Noordwijk, The Netherlands: ESA, 2010. Dostupné z: <https://ecss.nl/hbs/active-handbooks/>
- [3] SELTZER, Stephen. *Updated Calculations for Routine Space-Shielding Radiation Dose Estimates: SHIELDOSE-2* [online]. Gaithersburg: National Institute of Standards, 1994, s. 19 [cit. 2020-12-09]. Dostupné z: <https://www.nist.gov/publications/updated-calculations-routine-space-shielding-radiation-dose-estimates-shieldose-2>
- [4] OLDHAM, Timothy R. DSFG INC, NASA. *Basic Mechanisms of TID and DDD Response in MOS and Bipolar Microelectronics*. Dostupné z: https://nipp.nasa.gov/files/25337/Oldham_NSREC2011SC.pdf
- [5] Section 22. A Complete Analysis. *ESA Radiation Design Handbook* [online]. ESA PSS-01-609 Issue 1. Noordwijk, The Netherlands: ESA Publications Division, 1993, s. 399-401 [cit. 2020-12-09]. ISSN 0379-4059. Dostupné z: <https://escies.org/webdocument/showArticle?id=263&groupid=6>
- [6] TODHUNTER, I. *Spherical trigonometry: For the Use of Colleges and Schools: WITH NUMEROUS EXAMPLES* [online]. FIFTH EDITION. Cambridge; London: Macmillan, 1863 [cit. 2021-05-23]. ISBN OCLC : (OCoLC)9322778. Dostupné z: <http://www.gutenberg.org/files/19770/19770-pdf.pdf>
- [7] SZILVÁSI-NAGY, M. a Gy. MÁTYÁSI. Analysis of STL files. *Mathematical and Computer Modelling* [online]. Vol. 38. 2003, , s. 945-960 [cit. 2020-12-06]. ISSN 08957177. Dostupné z: doi:10.1016/S0895-7177(03)90079-3
- [8] BROWN, Kevin. *Min-Energy Configurations of Electrons On A Sphere* [online]. [cit. 2021-03-24]. Dostupné z: <https://www.mathpages.com/home/kmath005/kmath005.htm>

- [9] GONZÁLEZ, Álvaro. Measurement of Areas on a Sphere Using Fibonacci and Latitude–Longitude Lattices. *Mathematical Geosciences* [online]. 2010, (1), 49-64 [cit. 2020-12-07]. ISSN 1874-8961. Dostupné z: doi:10.1007/s11004-009-9257-x
- [10] BRAUCHART, Johann a Peter GRABNER. Distributing many points on spheres: Minimal energy and designs. *Journal of Complexity* [online]. Volume 31, Issue 3. 2015, , 293-326 [cit. 2021-03-27]. ISSN 0885-064X. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jco.2015.02.003>
- [11] ROBERTS, Martin. *How to evenly distribute points on a sphere more effectively than the canonical Fibonacci Lattice* [online]. [cit. 2021-03-25]. Dostupné z: <http://extremelearning.com.au/how-to-evenly-distribute-points-on-a-sphere-more-effectively-than-the-canonical-fibonacci-lattice/>
- [12] *MATLAB and Simulink Requirements* [online]. [cit. 2021-05-12]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/support/requirements/matlab-system-requirements.html>
- [13] *GPU Support by Release* [online]. [cit. 2021-05-12]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/parallel-computing/gpu-support-by-release.html>

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

Skratky:

TID	Total Ionising Dose
TNID	Total Non-Ionising Dose
TIDR	Total Ionising Dose Rate
ELDRS	Enhanced Low Dose Rate Sensitivity
DD	Displacement Damage
SEE	Single Event Effects
DDC	Dose-Depth Curve
MOS	Metal Oxide Semiconductor
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
JFET	Junction Field Effect Transistor
GUI	Graphical User Interface
LEO2	Low Earth Orbit 2

Symboly:

D	Dávka žiarenia	$(Gy, rad(Si))$
E	Energia	(eV)
m	Hmotnosť	(kg)
ρ	Hustota materiálu	(kg/m^3)
β	Prúdové zosilnenie tranzistoru	(A/V)

ZOZNAM OBRÁZKOV

1.1 – Prierez štruktúry integrovaného NMOS tranzistoru.....	11
2.1 – TID definovaná pre 4 elementárne geometrie.....	14
2.2 – Hrúbka materiálu pri metóde SLANT (vľavo) a NORM (vpravo)	17
2.3 – Dvojmerné znázornenie rozdelenia geometrie na 10 sektorov.	17
3.1 – Rozdelenie geometrie v tvare skrinky na 6 sektorov.	19
3.2 – Obdĺžnik premietnutý na jednotkovú guľu.	20
3.3 – Znázornenie uhlu A sférického trojuholníku.	20
3.4 – Grafické znázornenie SLANT metódy sektorovej analýzy.....	21
4.1 – Štruktúra popisu trojuholníkov v súbore formátu STL.	22
4.2 – Export STL siete hliníkovej skrinky z programu Autodesk Fusion™	23
4.3 – Rozmiestnenie lúčov podľa stien obklopujúcej kocky.....	25
4.4 – Rozmiestnenie lúčov podľa stien obklopujúcej kocky.....	26
4.5 – Rozloženie bodov pomocou krokovania uhlových súradníc.....	26
4.6 – Rozloženie bodov s kosínusovou závislosťou.	27
4.7 – Rozmiestnenie lúčov podľa Fibonacciho Zlatej špirály.	27
4.8 – Rozloženie lúčov podľa upravenej Fibonacciho Zlatej špirály.	28
4.9 – Rozloženie lúčov pomocou simulácie odpudzovania.	29
4.10 – Grafické znázornenie lúčov a ich priesečníkov s modelom skrinky.	30
5.1 – Diagram funkcie raytrace.....	34
5.2 – Uhol medzi dvoma bodmi trojuholníka.	35
5.3 – Načítanie geometrie a nastavenie zobrazenia	37
5.4 – Priradenie materiálu konkrétnej časti geometrie.....	37
5.5 – Nastavenie jednotlivých detektorov zadávaním do tabuľky.	38
5.6 – Nastavenie plošného detektoru pomocou sliderov.....	38
5.7 – Zobrazenie plošných detektorov s nastaveným rozlíšením.....	39
5.8 – Zobrazenie zoznamu aktívnych detektorov	39
5.9 – Načítanie DDC, nastavenie počtu lúčov a prídavného tienenia	40
5.10 – Kontrola nastavenia a odhad trvania simulácie.....	40
5.11 – Priebeh simulácie.....	41
5.12 – Zobrazenie 14 najhorších lúčov pre prvý analyzovaný bod.....	41
5.13 – Zobrazenie plošného rozloženia radiácie.....	42
5.14 – Samostatné zobrazenie plošnej radiácie a uloženie obrázku.....	42
6.1 – Dose-depth krivky pre sedem ročnú misiu v LEO2 orbite.....	43
6.2 – Graf rozloženia tienenia referenčnej geometrie C z programu SSAT.....	44
6.3 – 3D zobrazenie referenčnej geometrie A.....	45
6.4 – Ray trace analýza referenčnej geometrie A.	45
6.5 – SLANT sektorová analýza referenčnej geometrie A.	46
6.6 – NORM sektorová analýza referenčnej geometrie A.	46
6.7 – 3D zobrazenie referenčnej geometrie B.	47
6.8 – Ray trace analýza referenčnej geometrie B.....	47
6.9 – SLANT sektorová analýza referenčnej geometrie B.....	48
6.10 – NORM sektorová analýza referenčnej geometrie B.	48
6.11 – 3D zobrazenie referenčnej geometrie C.....	49
6.12 – Ray trace analýza referenčnej geometrie B.....	50
6.13 – SLANT sektorová analýza referenčnej geometrie C.....	51
6.14 – NORM sektorová analýza referenčnej geometrie C.	51

ZOZNAM TABULIEK

2.1 – 4 elementárne geometrie pre vyhodnotenie dávky radiácie.	15
2.2 – Výsledné hodnoty radiácie z príkladu normy ESA PSS-01-609.....	18
4.1 – Výsledky rovnomernosti rozloženia bodov na sfére.	29
6.1 – Výsledky rôznych metód analýzy	52

ZOZNAM PRÍLOH

PRÍLOHA A - REFERENCIA C V PROGRAME SPENVIS	60
PRÍLOHA B - NASTAVENIE MISIE A VÝSTUPNÉ DDC	62
PRÍLOHA C - ZDROJOVÝ KÓD NORM ALGORITMU	64
PRÍLOHA D - ZDROJOVÝ KÓD SLANT ALGORITMU.....	65
PRÍLOHA E - PODPOROVANÉ GPU ARCHITEKTÚRY	66
PRÍLOHA F - SYSTÉMOVÉ POŽIADAVKY MATLAB	67
PRÍLOHA G - ZDROJOVÉ KÓDY A INŠTALAČNÝ SÚBOR PROGRAMU.....	CD

Príloha A - Referencia C v programe SPENVIS

Geometry definition	
Shape 1: Satellite	
Geometry: Rectangular parallelepiped Dimensions: Length: 0.1000 m wall thickness (-X): 2.0000 mm wall thickness (+X): 2.0000 mm Width: 0.0800 m wall thickness (-Y): 2.0000 mm wall thickness (+Y): 2.0000 mm Height: 0.0500 m wall thickness (-Z): 2.0000 mm wall thickness (+Z): 2.0000 mm	Material: G4_Al
Reference coordinate system: world	
	Rotation axis: X: 0.0000 Y: 0.0000 Z: -0.0020 Rotation angle: 0.0000 deg
Shape 2	
Geometry: Rectangular parallelepiped Dimensions: Length: 0.0960 m wall thickness (-X): 48.0000 mm wall thickness (+X): 48.0000 mm Width: 0.0760 m wall thickness (-Y): 38.0000 mm wall thickness (+Y): 38.0000 mm Height: 0.0011 m wall thickness (-Z): 0.5480 mm wall thickness (+Z): 0.5480 mm	Material: G4_Al
Reference coordinate system: world	
Translation: X: 0.0000 m Y: 0.0000 m Z: 0.0000 m	Rotation axis: X: 0.0000 Y: 0.0000 Z: 0.0000 Rotation angle: 0.0000 deg
Detector	
Geometry: point	
Reference coordinate system: world	
Translation: X: 0.0000 m Y: 0.0000 m Z: 0.0020 m	

Shielding distribution		SSAT 1.0b		
Target_Position	3	0,000000	0,000000	0,000000
Shielding_Material	-1	G4_Al		
Shielding_Material_Density	1	2,699	g/cm3	

Lower edge of the bin	Upper edge of the bin	Mean position of the recorded bin data	Bin value	Error in bin value
[g/cm ²]	[g/cm ²]	[g/cm ²]	[Fraction of Solid Angle]	[Fraction of Solid Angle]
0,48	0,5275	0	0	0
0,5275	0,575	0,55777	0,077508	0,001729
0,575	0,6225	0,597553	0,096335	0,001928
0,6225	0,67	0,645046	0,067785	0,001617
0,67	0,7175	0,69237	0,049576	0,001383
0,7175	0,765	0,739713	0,038889	0,001225
0,765	0,8125	0,78764	0,032099	0,001113
0,8125	0,86	0,841435	0,053897	0,001442
0,86	0,9075	0,882632	0,068981	0,001631
0,9075	0,955	0,930694	0,060494	0,001528
0,955	1,0025	0,978421	0,050965	0,001402
1,0025	1,05	1,025728	0,043171	0,001291
1,05	1,0975	1,072678	0,038465	0,001218
1,0975	1,145	1,121563	0,032755	0,001124
1,145	1,1925	1,168077	0,027083	0,001022
1,1925	1,24	1,216113	0,029282	0,001063
1,24	1,2875	1,263751	0,029244	0,001062
1,2875	1,335	1,311304	0,027662	0,001033
1,335	1,3825	1,358221	0,02338	0,00095
1,3825	1,43	1,40673	0,021836	0,000918
1,43	1,4775	1,453565	0,019869	0,000876
1,4775	1,525	1,500197	0,016127	0,000789
1,525	1,5725	1,548211	0,014005	0,000735
1,5725	1,62	1,596946	0,010918	0,000649
1,62	1,6675	1,643016	0,010687	0,000642
1,6675	1,715	1,690392	0,008372	0,000568
1,715	1,7625	1,739334	0,007523	0,000539
1,7625	1,81	1,78634	0,004784	0,00043
1,81	1,8575	1,832502	0,004437	0,000414
1,8575	1,905	1,881094	0,004205	0,000403
1,905	1,9525	1,925851	0,003009	0,000341
1,9525	2	1,975555	0,002508	0,000311

Príloha B - Nastavenie misie a výstupné DDC

```
# Number of segment(s) in the mission: 1

#*****
# Segment : 1/1
#*****
# Name :                               Orbit LEO2 ISS
# Duration :                           7 year(s)
# Perigee :                             400.000000km
# Apogee :                              400.000000km
# Inclination :                         51.500°
# Argument of Perigee :                 0.000°
# Longitude of Ascending node :         0.000°
# (with respect to Greenwich)
# True Anomaly :                        0.000°
# Period :                              5553.627s
# Number of orbits :                     20
# Number of points per orbit :           100
```

Solid sphere (Al)				Shell sphere (Al)			
l	D	l	D	l	D	l	D
[mm]	[rad(Si)]	[mm]	[rad(Si)]	[mm]	[rad(Si)]	[mm]	[rad(Si)]
1,00E-02	1,81E+06	5,75E+00	5,04E+02	1,00E-02	2,02E+06	5,75E+00	4,73E+02
1,00E-01	3,61E+05	6,00E+00	4,71E+02	1,00E-01	3,66E+05	6,00E+00	4,45E+02
2,00E-01	1,41E+05	6,25E+00	4,45E+02	2,00E-01	1,34E+05	6,25E+00	4,18E+02
3,00E-01	7,19E+04	6,50E+00	4,16E+02	3,00E-01	6,68E+04	6,50E+00	4,00E+02
4,00E-01	4,33E+04	6,75E+00	4,02E+02	4,00E-01	4,02E+04	6,75E+00	3,84E+02
5,00E-01	2,93E+04	7,00E+00	3,85E+02	5,00E-01	2,72E+04	7,00E+00	3,68E+02
6,00E-01	2,15E+04	7,25E+00	3,69E+02	6,00E-01	2,01E+04	7,25E+00	3,57E+02
7,00E-01	1,67E+04	7,50E+00	3,60E+02	7,00E-01	1,57E+04	7,50E+00	3,48E+02
8,00E-01	1,36E+04	7,75E+00	3,46E+02	8,00E-01	1,28E+04	7,75E+00	3,41E+02
9,00E-01	1,14E+04	8,00E+00	3,45E+02	9,00E-01	1,07E+04	8,00E+00	3,34E+02
1,00E+00	9,76E+03	8,25E+00	3,37E+02	1,00E+00	9,24E+03	8,25E+00	3,25E+02
1,10E+00	8,55E+03	8,50E+00	3,25E+02	1,10E+00	8,11E+03	8,50E+00	3,19E+02
1,20E+00	7,59E+03	8,75E+00	3,22E+02	1,20E+00	7,20E+03	8,75E+00	3,13E+02
1,30E+00	6,82E+03	9,00E+00	3,15E+02	1,30E+00	6,48E+03	9,00E+00	3,09E+02
1,40E+00	6,18E+03	9,50E+00	3,07E+02	1,40E+00	5,87E+03	9,50E+00	3,04E+02
1,50E+00	5,64E+03	1,00E+01	3,02E+02	1,50E+00	5,35E+03	1,00E+01	2,98E+02
1,60E+00	5,17E+03	1,05E+01	2,98E+02	1,60E+00	4,90E+03	1,05E+01	2,92E+02
1,70E+00	4,75E+03	1,10E+01	2,90E+02	1,70E+00	4,50E+03	1,10E+01	2,85E+02
1,80E+00	4,38E+03	1,15E+01	2,84E+02	1,80E+00	4,14E+03	1,15E+01	2,80E+02
1,90E+00	4,05E+03	1,20E+01	2,81E+02	1,90E+00	3,84E+03	1,20E+01	2,73E+02
2,00E+00	3,75E+03	1,25E+01	2,71E+02	2,00E+00	3,55E+03	1,25E+01	2,70E+02
2,25E+00	3,11E+03	1,30E+01	2,70E+02	2,25E+00	2,93E+03	1,30E+01	2,66E+02
2,50E+00	2,60E+03	1,35E+01	2,68E+02	2,50E+00	2,43E+03	1,35E+01	2,59E+02
2,75E+00	2,20E+03	1,40E+01	2,59E+02	2,75E+00	2,05E+03	1,40E+01	2,54E+02
3,00E+00	1,87E+03	1,45E+01	2,53E+02	3,00E+00	1,73E+03	1,45E+01	2,51E+02
3,25E+00	1,60E+03	1,50E+01	2,52E+02	3,25E+00	1,48E+03	1,50E+01	2,48E+02
3,50E+00	1,38E+03	1,60E+01	2,44E+02	3,50E+00	1,28E+03	1,60E+01	2,37E+02
3,75E+00	1,20E+03	1,70E+01	2,34E+02	3,75E+00	1,11E+03	1,70E+01	2,30E+02
4,00E+00	1,05E+03	1,80E+01	2,28E+02	4,00E+00	9,64E+02	1,80E+01	2,24E+02
4,25E+00	9,19E+02	1,90E+01	2,22E+02	4,25E+00	8,47E+02	1,90E+01	2,20E+02
4,50E+00	8,15E+02	2,00E+01	2,15E+02	4,50E+00	7,50E+02	2,00E+01	2,17E+02
4,75E+00	7,25E+02	3,00E+01	1,66E+02	4,75E+00	6,71E+02	3,00E+01	1,66E+02
5,00E+00	6,55E+02	4,00E+01	1,32E+02	5,00E+00	6,06E+02	4,00E+01	1,30E+02
5,25E+00	5,93E+02	5,00E+01	1,08E+02	5,25E+00	5,51E+02	5,00E+01	1,13E+02
5,50E+00	5,43E+02	1,00E+02	3,85E+01	5,50E+00	5,08E+02	1,00E+02	3,41E+01

Príloha C - Zdrojový kód NORM algoritmu

```
function angle = calc_angle(square, test_point)
    angle = 0;
    ud = square(1,:) - test_point;
    vd = square(2,:) - test_point;
    ab = acos(dot(ud,vd)/norm(ud)/norm(vd));
    ud = square(2,:) - test_point;
    vd = square(3,:) - test_point;
    bc = acos(dot(ud,vd)/norm(ud)/norm(vd));
    ud = square(3,:) - test_point;
    vd = square(4,:) - test_point;
    cd = acos(dot(ud,vd)/norm(ud)/norm(vd));
    ud = square(4,:) - test_point;
    vd = square(1,:) - test_point;
    da = acos(dot(ud,vd)/norm(ud)/norm(vd));
    ud = square(1,:) - test_point;
    vd = square(3,:) - test_point;
    ac = acos(dot(ud,vd)/norm(ud)/norm(vd));
    ud = square(2,:) - test_point;
    vd = square(4,:) - test_point;
    bd = acos(dot(ud,vd)/norm(ud)/norm(vd));
    angle = angle + acos((cos(bd)-cos(ab)*cos(da))/(sin(ab)*sin(da)));
    angle = angle + acos((cos(ac)-cos(ab)*cos(bc))/(sin(ab)*sin(bc)));
    angle = angle + acos((cos(bd)-cos(bc)*cos(cd))/(sin(bc)*sin(cd)));
    angle = angle + acos((cos(ac)-cos(da)*cos(cd))/(sin(da)*sin(cd)));

    angle = angle - 2*pi();
end
```

Vstupný obdĺžnik a testovací bod musia byť zadané ako:

```
square = [x_A, y_A, z_A;
          x_B, y_B, z_B;
          x_C, y_C, z_C;
          x_D, y_D, z_D];

test_point = [x; y; z];
```

Príloha D - Zdrojový kód SLANT algoritmu

```
function [x, angle] = slant_sektor(squares, norm_vector, test_point, c_width)
    center = (squares(1,:,:,:) + squares(4,:,:,:))/2;
    center = reshape(center, 3, size(center, 3), []);
    test_point = repmat(test_point', 1, size(center, 2), size(center, 3));
    norm_vector = repmat(norm_vector, 1, size(center, 2), size(center, 3));
    x = c_width*vecnorm(center-test_point, 2, 1);
    x = reshape(x, 1, size(x, 3), []);
    x = x./abs(dot(center-test_point, norm_vector, 1));
    x = reshape(x, size(x, 2), []);
    angle = 0;
    ud = reshape(squares(1,:,:,:), 3, size(squares, 3), [])-test_point;
    vd = reshape(squares(4,:,:,:), 3, size(squares, 3), [])-test_point;
    ac = acos(dot(ud,vd,1)./vecnorm(ud,2,1)./vecnorm(vd,2,1));
    ud = reshape(squares(1,:,:,:), 3, size(squares, 3), [])-test_point;
    vd = reshape(squares(2,:,:,:), 3, size(squares, 3), [])-test_point;
    ab = acos(dot(ud,vd,1)./vecnorm(ud,2,1)./vecnorm(vd,2,1));
    ud = reshape(squares(2,:,:,:), 3, size(squares, 3), [])-test_point;
    vd = reshape(squares(4,:,:,:), 3, size(squares, 3), [])-test_point;
    bc = acos(dot(ud,vd,1)./vecnorm(ud,2,1)./vecnorm(vd,2,1));
    ud = reshape(squares(4,:,:,:), 3, size(squares, 3), [])-test_point;
    vd = reshape(squares(3,:,:,:), 3, size(squares, 3), [])-test_point;
    cd = acos(dot(ud,vd,1)./vecnorm(ud,2,1)./vecnorm(vd,2,1));
    ud = reshape(squares(3,:,:,:), 3, size(squares, 3), [])-test_point;
    vd = reshape(squares(1,:,:,:), 3, size(squares, 3), [])-test_point;
    da = acos(dot(ud,vd,1)./vecnorm(ud,2,1)./vecnorm(vd,2,1));
    ud = reshape(squares(3,:,:,:), 3, size(squares, 3), [])-test_point;
    vd = reshape(squares(2,:,:,:), 3, size(squares, 3), [])-test_point;
    db = acos(dot(ud,vd,1)./vecnorm(ud,2,1)./vecnorm(vd,2,1));
    angle = angle + acos((cos(db)-cos(da).*cos(ab))./(sin(da).*sin(ab)));
    angle = angle + acos((cos(ac)-cos(ab).*cos(bc))./(sin(ab).*sin(bc)));
    angle = angle + acos((cos(db)-cos(cd).*cos(bc))./(sin(cd).*sin(bc)));
    angle = angle + acos((cos(ac)-cos(da).*cos(cd))./(sin(da).*sin(cd)));

    angle = reshape(angle, size(angle, 2), []) - 2*pi();
end
```

Vstupný obdĺžnik a testovací bod musia byť zadané ako:

```
square = [x_A, y_A, z_A;
          x_B, y_B, z_B;
          x_C, y_C, z_C;
          x_D, y_D, z_D];

test_point = [x; y; z];
```

Príloha E - Podporované GPU architektúry

MATLAB Release	Ampere (cc8.x)	Turing (cc7.5)	Volta (cc7.0, cc7.2)	Pascal (cc6.x)	Maxwell (cc5.x)	Kepler (cc3.5, cc3.7)	Kepler (cc3.0, cc3.2)	Fermi (cc2.x)	Tesla (cc1.3)	CUDA® Toolkit Version
R2021a	✓	✓	✓	✓	✓†	✓†				11.0
R2020b	△	✓	✓	✓	✓†	✓†	✓†			10.2
R2020a	✓*	✓	✓	✓	✓†	✓†	✓†			10.1
R2019b	✓*	✓	✓	✓	✓	✓	✓			10.1
R2019a	✓*	✓	✓	✓	✓	✓	✓			10.0
R2018b	✓*	✓	✓	✓	✓	✓	✓			9.1
R2018a	✓*	✓	✓	✓	✓	✓	✓			9.0
R2017b	✓*	✓*	✓*	✓	✓	✓	✓	✓		8.0
R2017a	✓*	✓*	✓*	✓	✓	✓	✓	✓		8.0
R2016b	✓*	✓*	✓*	✓*	✓	✓	✓	✓		7.5
R2016a	✓*	✓*	✓*	✓*	✓	✓	✓	✓		7.5
R2015b	✓*	✓*	✓*	✓*	✓	✓	✓	✓		7.0
R2015a	✓*	✓*	✓*	✓*	✓	✓	✓	✓		6.5
R2014b	✓*	✓*	✓*	✓*	✓	✓	✓	✓	✓	6.0
R2014a	✓*	✓*	✓*	✓*	✓*	✓	✓	✓	✓	5.5
R2013b	✓*	✓*	✓*	✓*	✓*	✓	✓	✓	✓	5.0
R2013a	✓*	✓*	✓*	✓*	✓*	✓	✓	✓	✓	5.0
R2012b	✓*	✓*	✓*	✓*	✓*	✓	✓	✓	✓	4.2
R2012a	✓*	✓*	✓*	✓*	✓*	✓*	✓	✓	✓	4.0
R2011b	✓*	✓*	✓*	✓*	✓*	✓*	✓	✓	✓	4.0

- ✓ - Vstavaná podpora.
- ✓† - Podpora pre Kepler a Maxwell GPU architektúry bude odstránená v budúcich vydaniach. V nich bude potrebná hodnota *Compute Compatibility* väčšia alebo rovná 6.0. MATLAB vygeneruje upozornenie pri prvom použití Kepler alebo Maxwell grafickej karty.
- ✓* - Podporované prostredníctvom doprednej kompatibility. Optimalizované knižnice zariadenia musia byť skompilované pre spustení program z neoptimalizovanej verzie. Podpora môže byť limitovaná a môžete pozorovať chyby alebo neočakávané správanie.
- △ - Môžete umožniť podporu zapnutím doprednej kompatibility pre GPU zariadenia. Môžete pozorovať chyby a neočakávané správanie.

Príloha F - Systémové požiadavky MATLAB

Operating Systems

- Windows 10 (version 1803 or higher)
- Windows 7 Service Pack 1
- Windows Server 2019
- Windows Server 2016

Processors

Minimum: Any Intel or AMD x86-64 processor

Recommended: Any Intel or AMD x86-64 processor with four logical cores and AVX2 instruction set support

Disk

Minimum: 3.4 GB of HDD space for MATLAB only, 5-8 GB for a typical installation

Recommended: An SSD is recommended

A full installation of all MathWorks products may take up to 29 GB of disk space

RAM

Minimum: 4 GB

Recommended: 8 GB

For Polyspace, 4 GB per core is recommended

Graphics

No specific graphics card is required.

Hardware accelerated graphics card supporting OpenGL 3.3 with 1GB GPU memory is recommended.

GPU acceleration using Parallel Computing Toolbox requires a GPU that has a compute capability 3.0 or higher. For more information, see GPU Support by Release.